

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie civil

# Évaluation de l'état des dalles en béton armé enterrées

Mémoire de maîtrise

Spécialité : génie civil

Samson Kossou

Jury : Arezki Tagnit-Hamou (directeur)

François Boone (co-directeur)

Jamal Rhazi

Ammar Yahia



# RÉSUMÉ

Dans le souci d'améliorer le réseau de distribution de l'énergie électrique, tout en maintenant l'intégrité de certains sites urbains protégés, plusieurs municipalités du Québec ont choisi d'enfouir leurs fils électriques. Ce type d'installation requiert des chambres de raccordement souterraines afin de réaliser l'entretien du réseau et le câblage. Ces chambres sont typiquement placées à tous les 300 mètres du réseau et sont généralement recouvertes d'épaisseurs de remblai allant de 0,6 m à 1 m. L'un des principaux problèmes affectant l'état structural de ces chambres est la dégradation du béton de la surface externe de celles-ci. Dans certains cas, la dégradation peut atteindre une portion non négligeable de l'épaisseur de la dalle, jusqu'à en causer l'effondrement. En plus de présenter un danger pour la population, ces effondrements entraînent des coûts d'entretien élevés pour les propriétaires d'ouvrages. En outre, ces chambres sont difficiles à inspecter par l'intérieur. Cette problématique est d'autant plus importante étant donné la grande quantité de chambres de raccordement souterraines construites par le passé. Dans ce contexte, Hydro-Québec a lancé un programme de recherche visant à faire **l'évaluation** par des techniques de contrôle non destructif de **l'état** du béton du toit des chambres de raccordement souterraines. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude. Le but de notre projet est d'évaluer les capacités de la technique du Géoradar à détecter l'endommagement du béton et, si possible, déterminer l'étendue en profondeur des dégradations dans le béton de ces **dalles en béton armé enterrées**. Ce mémoire de maîtrise présente la méthode proposée pour atteindre cet objectif. Des simulations numériques ont été réalisées, dans un premier temps, pour établir les limites de l'application Géoradar dans le cadre de notre problématique. Les résultats obtenus ont ensuite été confrontés à des essais réalisés sur des dalles réelles enterrées. Les travaux ont permis de montrer sans équivoque qu'avec le Géoradar, il est possible de déceler la dégradation au niveau des dalles enterrées, lorsque celles-ci se situaient à une profondeur maximale de 75 cm sous un sol de type sableux. Mais, il est encore difficile de pouvoir estimer l'étendue en profondeur de la dégradation, sans connaître l'état initial des dalles.

**Mots-clés :** Évaluation, État, Dalles en béton armé enterrées

*Au créateur, à mes parents*

# REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mon directeur de recherche M. Arezki Tagnit-Hamou, professeur titulaire au département de génie civil, pour avoir accepté de diriger mes travaux, et surtout pour toute la patience à mon égard dont il a fait preuve. J'aimerais aussi remercier M. Jamal Rhazi professeur associé au département de génie civil, qui m'a proposé de participer à ce projet de recherche, et qui a toujours su trouver du temps pour me former et me conseiller. J'aimerais aussi remercier mon co-directeur de recherche M. François Boone professeur titulaire au département de génie électrique et de génie informatique, d'avoir accepté de m'aider tout au long des travaux. Je remercie aussi l'IREQ et surtout M. Mohamed Chekired, de nous avoir donné l'opportunité d'utiliser son site pour nos essais. Je remercie aussi M. Ammar Yahia professeur agrégé au département de génie civil, d'avoir accepté de corriger ce mémoire. Je remercie également la compagnie Auscultech inc. et le FQRNT qui ont financé mes études à travers une bourse en milieu de pratique (BMP) dont j'ai bénéficiée pendant une année. Finalement, j'aimerais remercier le créateur et mes parents pour des raisons qu'ils connaissent bien.



# TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ .....	i
REMERCIEMENTS .....	iii
TABLE DES MATIÈRES .....	v
LISTE DES FIGURES .....	viii
LISTE DES TABLEAUX .....	xi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte et problématique .....	1
1.2 Définition du projet de recherche .....	2
1.3 Objectifs du projet de recherche .....	2
1.4 Contributions originales.....	3
1.5 Organisation du document .....	3
CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART .....	4
2.1 Le Géoradar : Historique et définition .....	4
2.2 Principe du Géoradar .....	4
2.3 Rappels de la théorie sur l'électromagnétisme .....	7
2.4 Facteurs affectant la propagation des ondes électromagnétiques .....	9
2.4.1 La permittivité électrique.....	9
2.4.2 La perméabilité magnétique .....	12
2.4.3 La conductivité électrique .....	14
2.5 Propriétés des ondes électromagnétiques .....	15
2.5.1 La fréquence .....	15
2.5.2 La vitesse de propagation .....	16
2.5.3 L'atténuation et l'absorption.....	17
2.5.4 La réflexion.....	20
2.6 Causes de dégradation des dalles en béton armée .....	21
2.6.1 La corrosion des armatures dans le béton.....	23
2.6.2 Les réactions sulfatiques et alcali-granulats dans le béton .....	24
2.7 Détection des dégradations du béton avec le Géoradar .....	26
2.7.1 Principe de détection des anomalies.....	26

2.7.2	Avantages et limites de la technique RADAR .....	28
CHAPITRE 3 SIMULATIONS NUMÉRIQUES.....		30
3.1	Introduction.....	30
3.2	Approche proposée .....	30
3.3	Modèles des simulations numériques .....	32
3.3.1	Premier Modèle .....	34
3.3.2	Deuxième modèle.....	35
3.3.3	Troisième modèle .....	37
3.4	Résultats des simulations numériques .....	38
3.4.1	Premier lot de simulations .....	38
3.4.2	Deuxième lot de simulations .....	39
3.4.3	Troisième lot de simulations .....	40
3.4.4	Quatrième lot de simulations.....	41
3.4.5	Conclusion des simulations .....	43
CHAPITRE 4 RELEVÉS EXPÉRIMENTAUX .....		44
4.1	Processus expérimental.....	44
4.1.1	Site expérimental .....	44
4.1.2	Équipement utilisé .....	45
4.1.3	Relevés effectués .....	48
4.2	Présentation des résultats .....	51
4.2.1	Radargrammes bruts .....	51
4.2.2	Traitements des radargrammes.....	51
4.2.3	Radargrammes traités des six dalles.....	55
4.2.4	Résultats obtenus avec les dalles D1, D2 et D3 .....	57
4.2.4.1	Résultat des profils mixtes .....	57
4.2.4.2	Résultat des profils obtenus avec la polarisation 1 .....	58
4.2.4.3	Résultat des profils obtenus avec la polarisation 2 .....	59
4.3	Analyse et interprétation des résultats .....	60
4.3.1	Analyse visuelle.....	60
4.3.2	Analyse des amplitudes de réflexion.....	63



4.3.2.1	Analyse des amplitudes de réflexion sur les armatures supérieures .....	63
4.3.2.2	Analyse des amplitudes de réflexion sur l'intrados des dalles .....	66
4.3.3	Analyse des temps de réflexion sur les armatures .....	69
4.3.4	Interprétations des résultats .....	71
CHAPITRE 5	CONCLUSIONS .....	74
ANNEXE	.....	77
LISTES DES RÉFÉRENCES	.....	84

# LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Présentation schématique d'un champ électromagnétique.....	5
Figure 2-2 : Schéma du principe de fonctionnement d'un Géoradar .....	6
Figure 2-3 : Radargramme (2D scan) du Géoradar .....	6
Figure 2-4 : Influence des différentes polarisations en fonction de la fréquence.....	10
Figure 2-5 : Spectre électromagnétique [Joseph, 2005] .....	16
Figure 2-6 : Signal de l'onde directe d'un Géoradar à antennes émettrice et réceptrice couplées [Sbartai <i>et al.</i> , 2007] .....	19
Figure 2-7 : Réflexion des ondes électromagnétiques [Pain, 2005] .....	21
Figure 2-8 : Mécanismes de la corrosion [Dous, 2008] .....	24
Figure 2-9 : Réactions sulfatiques [Courard, 2010] .....	25
Figure 2-10 : Principe du Géoradar pour l'auscultation de dalle en béton armé .....	27
Figure 3-1: Principe de l'auscultation des dalles par Géoradar .....	31
Figure 3-2 : Différentes réflexions dans le cas d'un béton sans dégradation.....	31
Figure 3-3 : Différentes réflexions dans le cas d'une désagrégation du béton jusqu' à la 1 <sup>ère</sup> armature .....	32
Figure 3-4 : Différentes réflexions dans le cas d'une désagrégation du béton jusqu'à la 2 <sup>ème</sup> armature .....	32
Figure 3-5 : Configuration géométrique du premier modèle.....	35
Figure 3-6 : Configuration géométrique du deuxième modèle.....	36
Figure 3-7 : Configuration géométrique du troisième modèle .....	37
Figure 3-8 : Résultats des simulations avec le premier modèle aux quatres fréquences.....	39
Figure 3-9 : Résultats des simulations à 400 MHz avec le premier modèle, avec différentes épaisseurs de remblai.....	40
Figure 3-10 : Résultats des simulations à 400 MHz avec le premier modèle, avec la même épaisseur de remblai de 60 cm, mais différents types de sol .....	41
Figure 3-11 : Résultats des simulations à 400 MHz de la dégradation dans le béton, d'une dalle enfouie sous un remblai de type sableux de 60 cm d'épaisseur.....	42
Figure 4-1 : Disposition des chambres d'essais de l'IREQ .....	44
Figure 4-2 : Géométrie d'une chambre souterraine .....	45

Figure 4-3 : Composantes du système d'acquisition des données .....	46
Figure 4-4 : Configuration de l'antenne utilisée comportant des dipôles haute fréquence (HF) et basse fréquence (BF). .....	46
Figure 4-5 : Paramètres de réglage pour l'antenne 900/400 MHz .....	47
Figure 4-6 : Paramètres de réglage pour l'antenne 600/200 MHz .....	48
Figure 4-7 : Polarisation des antennes .....	49
Figure 4-8 : Relevés longitudinaux sur une dalle .....	49
Figure 4-9 : Relevés transversaux sur une dalle .....	50
Figure 4-10 : Radargrammes brutes des relevés effectués sur la ligne longitudinale (L05) de la dalle D1 aux quatre fréquences .....	51
Figure 4-11 : Radargrammes obtenus après traitement de la ligne longitudinale (L05) de la dalle D1 avec les deux polarisations pour les fréquences de 200 MHz et 400 MHz .....	53
Figure 4-12 : Radargrammes obtenus après traitement de la ligne longitudinale (L05) de la dalle D1 avec les deux polarisations pour les fréquences de 600 MHz et 900 MHz .....	54
Figure 4-13: Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L05) pour toutes les dalles à la fréquence de 400 MHz avec la polarisation 1 .....	55
Figure 4-14 : Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L05) pour toutes les dalles à la fréquence de 400 MHz, avec la polarisation 2 .....	56
Figure 4-15 : Processus pour l'obtention de profil mixte .....	57
Figure 4-16: Processus de migration .....	58
Figure 4-17: Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L05) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz avec la polarisation 1 (avec migration) .....	59
Figure 4-18 : Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L05) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 2 .....	60
Figure 4-19 : Analyse des radargrammes traités - exemple de la ligne longitudinale (L05) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 1 .....	61
Figure 4-20 : Analyse des radargrammes traités - exemple de la ligne longitudinale (L05) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 2 .....	62
Figure 4-21 : Exemple de l'opération de Pick sur les armatures .....	63
Figure 4-22 : Comparaison des amplitudes de réflexion sur les armatures des trois dalles avec les lignes longitudinales L01 à L07 .....	65

Figure 4-23 : Exemple de l'opération de Pick sur intrados d'une dalle .....	66
Figure 4-24 : Comparaison des amplitudes de réflexion sur l'intrados des trois dalles avec les lignes longitudinales L01 à L07 .....	68
Figure 4-25 : Comparaison des temps de réflexion sur les armatures des trois dalles avec les lignes longitudinales L01 à L07 .....	70
Figure 4-26: Exemple de l'opération de Pick sur l'extrados d'une dalle .....	73
Figure A-1 : Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L03) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 1 .....	78
Figure A-2 : Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L03) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 2 .....	78
Figure A-3 : Radargrammes mixtes de la ligne longitudinale (L03) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz.....	79
Figure A-4: Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L07) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 1 .....	79
Figure A-5 : Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L07) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 2 .....	80
Figure A-6 : Radargrammes mixtes de la ligne longitudinale (L07) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz.....	80
Figure A-7 : Exemple de Picks effectués sur dalle D1 .....	81
Figure A-8 : Exemple de Picks effectués sur dalle D2 .....	82
Figure A-9 : Exemple de Picks effectués sur dalle D3 .....	83

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Valeurs indicatives de la constante diélectrique et de la vitesse de propagation	12
Tableau 2-2 : Différentes valeurs courantes de la constante diélectrique des bétons.....	17
Tableau 2-3 : Avantages et limites du Géoradar [IAEA, 2002] .....	29
Tableau 3-1 : Valeurs des propriétés électromagnétiques de divers matériaux .....	34
Tableau 3-2 : Propriétés électromagnétiques des matériaux pour le premier modèle [ Neyrat, 2009] .....	35
Tableau 3-3 : Propriétés électromagnétiques des matériaux pour le deuxième modèle [ Neyrat, 2009] .....	36
Tableau 3-4 : Propriétés électromagnétiques des matériaux pour le troisième modèle [ Neyrat, 2009] .....	37
Tableau 4-1 : Paramètres de traitement pour chaque fréquence.....	52

# CHAPITRE 1 INTRODUCTION

## 1.1 Mise en contexte et problématique

Dans le souci d'améliorer leur réseau de distribution, plusieurs compagnies de télécommunication ou d'électricité ont choisi d'enfouir leurs câbles sous terre. Cette solution requiert des chambres souterraines permettant le raccordement souterrain de ces câbles. Les chambres ont généralement une longueur de 3,50 m, pour une largeur de 2,50m avec une hauteur de 3,00 m. Ces chambres placées à intervalles réguliers sont en béton armé et recouvertes de remblai dont l'épaisseur varie entre 0,60 m et 1m. L'un des principaux problèmes affectant l'état structural de ces chambres est la désagrégation du béton des toits de celles-ci. Dans certains cas, la dégradation peut atteindre une portion non négligeable de l'épaisseur du toit et peut en causer l'effondrement. Il devient donc impératif pour ces compagnies de pouvoir prévenir l'effondrement du toit de ces chambres en ayant une idée assez précise de leur niveau de dégradation. Pour ce faire plusieurs méthodes existent, allant de celles destructives comme le carottage à celles non destructives. Les méthodes destructives nécessitent non seulement que le remblai soit dégagé, mais aussi affectent la capacité structurale des ouvrages auscultés. Ces techniques destructives créent donc des désagréments que l'on peut éviter en utilisant des techniques non destructives. Au nombre de celles-ci, figure le Géoradar qui est basé sur le principe de propagation des ondes électromagnétiques.

La recherche présentée ici vise l'évaluation des capacités de la technique du Géoradar à détecter l'endommagement du béton et à déterminer l'étendue en profondeur des dégradations dans la peau du béton des dalles souterraines dont notamment celui des chambres souterraines à partir de la surface du sol. Le choix du Géoradar est justifié par le fait que la prise des relevés est très rapide et facile à réaliser.

## 1.2 Définition du projet de recherche

L'utilisation et le développement de la technique de prospection électromagnétique se sont considérablement accrus depuis les années 1980 conduisant ainsi à deux types de finalités : la caractérisation du sous-sol (texture, composition, teneur en eau, etc.) et la détection, la localisation et éventuellement l'identification d'objets enfouis (mines, tuyaux, cavités, etc.). Mais il n'existe pas à ce jour d'études publiées qui traitent de l'auscultation de dalles enterrées avec le Géoradar à partir de la surface du sol. Cependant, diverses études existent sur l'auscultation Géoradar de dalles non enterrées et la caractérisation du béton d'enrobage comme celles de Lorenzo [Lorenzo *et al.*, 2000] ou de Laurens [Laurens, 2001], et présentent de très bons résultats. La recherche présentée ici vise donc l'évaluation des capacités de la technique du Géoradar à détecter l'endommagement du béton et à déterminer l'étendue en profondeur de ces dégradations dans les dalles souterraines. La question de recherche pourra être formulée comme suit : le Géoradar permet-il d'évaluer l'état de désagrégation du béton des dalles enterrées à partir de la surface du sol ?

Le principe de la détection par Géoradar consiste à émettre une onde électromagnétique dans un milieu à partir d'une source et à enregistrer les réflexions de cette onde afin de les analyser. Les réflexions des ondes électromagnétiques proviennent des diverses interfaces du système étudié. Dans le cas d'une dalle en béton armé l'analyse des réflexions permet de mettre en évidence les aciers d'armature et les surfaces supérieure et inférieure de la dalle. Les informations obtenues sur ces trois interfaces permettent d'identifier des zones altérées ou fissurées, ou encore d'évaluer l'épaisseur de béton. Ce principe fonctionne bien avec les dalles non enterrées, et c'est lui que nous utiliserons dans notre étude avec quelques améliorations.

## 1.3 Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal de notre étude est de développer une méthode permettant de déterminer l'état de désagrégation des dalles enterrées à partir de la surface du sol grâce au système Géoradar.

De cet objectif principal découle des objectifs spécifiques que nous devons atteindre, à savoir :

- Déterminer la meilleure fréquence des antennes à utiliser : le choix de la fréquence des antennes pour l'émission et la réception des ondes Géoradar est crucial. Cette

fréquence doit être suffisamment basse pour permettre de sonder des profondeurs plus grandes dans le remblai, et suffisamment haute pour avoir une précision suffisante sur l'épaisseur de béton endommagé.

- Évaluer l'effet du type de sol sur l'atténuation du signal : la performance du Géoradar dans cette problématique dépend aussi du type de sol sous lequel la dalle est enterrée.
- Évaluer la perte d'épaisseur sous forme de désagrégation de la dalle de béton, et donner une estimation de cette mesure.

## **1.4 Contributions originales**

Notre étude permettra d'établir une première approche pour l'évaluation de l'état des dalles enterrées avec la technique Géoradar. Notre projet se révèle donc assez innovateur, car très peu de recherches (ou pas) ont été réalisées jusqu'à présent dans ce sens. Notre projet permettra donc de définir les prémices des possibilités et des limites, qu'offre l'utilisation des ondes électromagnétiques, afin de définir l'état des dalles enterrées.

## **1.5 Organisation du document**

Le mémoire présent comporte cinq (5) chapitres (y compris l'introduction et la conclusion) suivis d'une annexe. Les chapitres ont été organisés afin que le lecteur puisse suivre de façon chronologique l'évolution des travaux de recherche.

Le chapitre 2 présente l'état de l'art sur le sujet, en rappelant au passage l'ensemble des connaissances techniques et théoriques nécessaires au sujet. Elle permet notamment, au lecteur de se familiariser avec les différents mécanismes pouvant causer la dégradation d'une dalle de béton enfouie dans le sol. Mais aussi, de comprendre comment les ondes électromagnétiques permettent d'évaluer l'état de cette dalle.

Les chapitres 3 et 4 présentent quant à eux les travaux de recherches ayant été effectués dans le cadre de ce projet. Dans le chapitre 3, nous présentons les simulations numériques réalisées ; tandis que dans le chapitre 4 nous présentons les travaux effectués sur le site expérimental de l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec (IREQ) construit pour d'autres expériences autres que la nôtre. Les résultats des essais qui y ont été réalisés sont aussi présentés au chapitre 4.

Le chapitre 5 résume l'ensemble des travaux de recherches qui ont été réalisés ; et présente les conclusions qui peuvent en être tirées.



# CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART

## 2.1 Le Géoradar : Historique et définition

L'invention du radar (acronyme de «radio detection and ranging») remonte à l'époque de la deuxième guerre mondiale pour des fins militaires. Le radar est un système qui utilise les ondes radio pour détecter la présence ainsi que déterminer la position et la vitesse d'objets tels que les avions, les bateaux, ou encore la pluie. Son principe consiste à envoyer des ondes radio qui sont réfléchies par l'objet cible. Ensuite, les réflexions sont détectées par un récepteur qui est généralement situé au même endroit que l'émetteur. Le radar est utilisé dans de nombreux domaines comme la météorologie, le contrôle des trafics aérien et routier, en astronomie, etc.

En génie civil, l'utilisation du radar a commencé à la fin des années 1970. On parle alors de Géoradar, GPR (pour Ground Penetrating Radar en anglais) ou encore RPS en français (pour Radar à Pénétration de Sol). Au fait, le premier radar spécialement conçu pour pénétrer dans le sol a été développé au MIT à la fin des années 1960 pour l'armée américaine afin de trouver des tunnels pendant la guerre au Vietnam. Et c'est en 1970 que la première société commerciale a été créée pour fabriquer et vendre du matériel et des services GPR. En 1974, le premier brevet de GPR a été délivré. Depuis ce temps, la technologie GPR a explosé, en parallèle des progrès technologiques dans l'industrie informatique et électronique [Loken, 2005].

Le Géoradar est un appareil géophysique utilisant le principe d'un radar que l'on pointe vers le sol ou les ouvrages pour en étudier la composition et la structure. Le fonctionnement du Géoradar est basé sur l'émission d'impulsion électromagnétique de durée inférieure à une nanoseconde. Comprenant maintenant d'où vient le nom Géoradar, il serait judicieux d'en comprendre plus en détail le fonctionnement.

## 2.2 Principe du Géoradar

Le Géoradar est une méthode d'auscultation utilisant les ondes électromagnétiques de 0,01 à 2 GHz. Une onde électromagnétique peut être définie comme la combinaison de deux (2) perturbations, celle magnétique et électrique issues respectivement de la propagation d'un champ magnétique et d'un champ électrique liés créés par une source (figure 2-1).

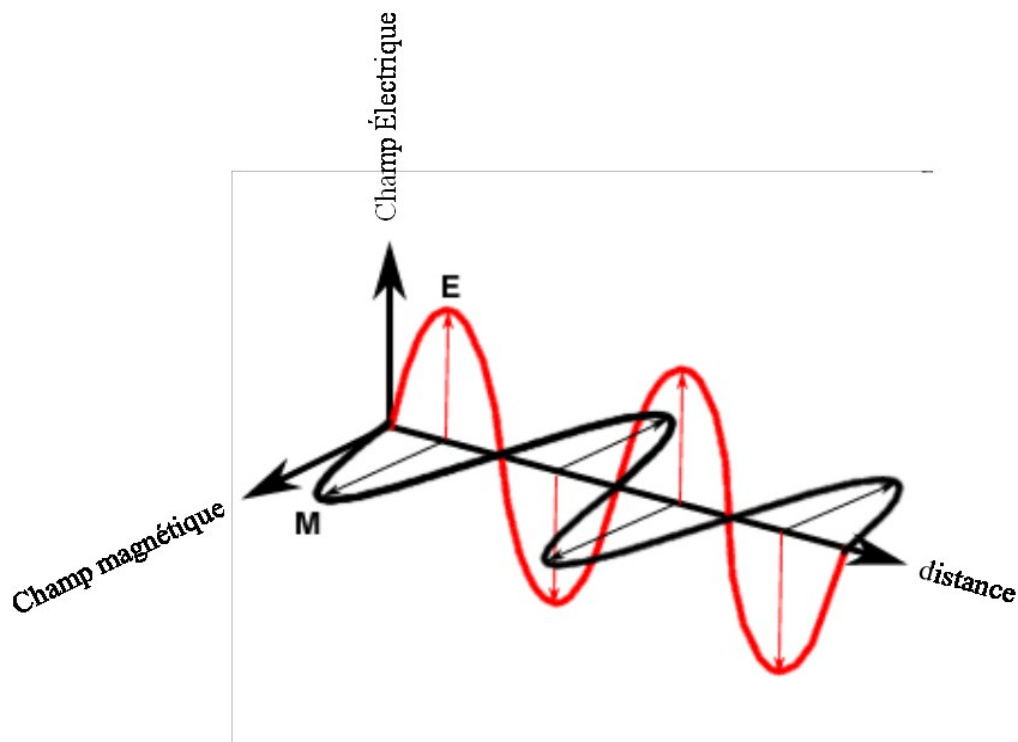


Figure 2-1 : Présentation schématique d'un champ électromagnétique

Le GPR est constitué d'une antenne émettrice, d'une antenne réceptrice, d'un convertisseur analogique-numérique et d'un ordinateur portable pour la visualisation. Dans le cas de la prospection des sols, le système permet d'interpréter les signaux détectés en réflexion ou transmission suite à leur propagation dans le sol (figure 2-2).

Les contrastes de propriétés électromagnétiques présentent dans le sol (conductivité, permittivité diélectrique, perméabilité magnétique) permettent la réflexion d'une partie de l'énergie émise par la source. Les réflexions sont enregistrées au récepteur pendant un intervalle de temps prédéfini par l'opérateur (correspondance avec la profondeur investiguée). Cet enregistrement est fait en un point donné de la ligne de relevé et constitue une trace (scan 1D) de cette ligne. En évoluant sur la même ligne, d'autres enregistrements (traces) sont faits au fur et à mesure selon le pas d'enregistrement de mesure préprogrammé (par exemple tous les 5 cm). De façon instantanée les traces successives sont ensuite mises côte à côte et l'on obtient une image 2D (2D scan) de la ligne suivant laquelle le relevé est effectué (figure 2-3 b). Cette image constituée uniquement des variations d'amplitudes des signaux est moins agréable à l'œil. Ainsi, des niveaux de couleurs sont appliqués à ces amplitudes et l'on obtient

une image en couleur plus agréable que l'opérateur voit sur son l'écran d'ordinateur, appelée généralement Radargramme (figure 2-3a).

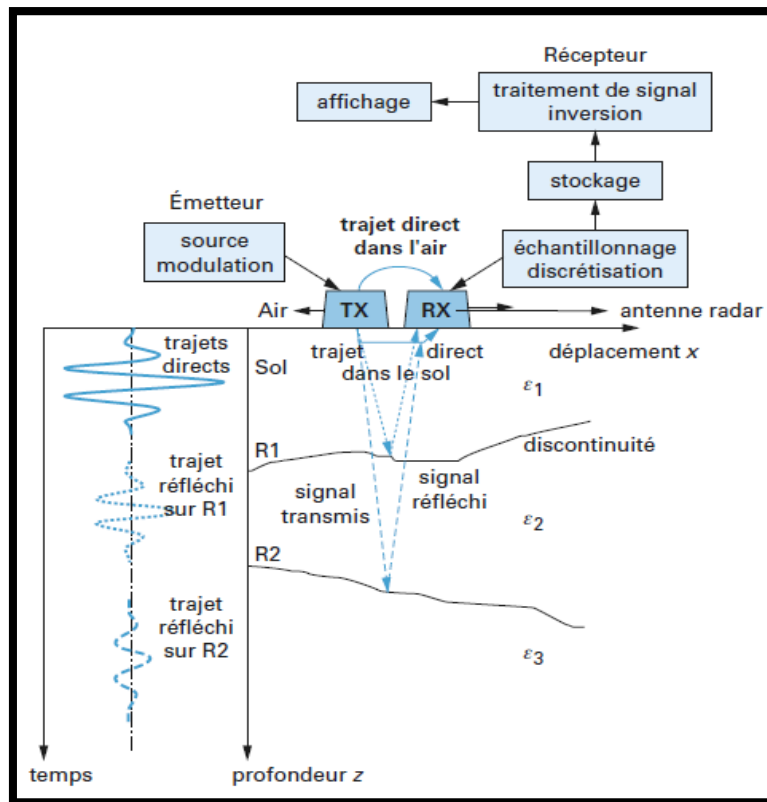


Figure 2-2 : Schéma du principe de fonctionnement d'un Géoradar [Sagnard et Rejiba, 2010]

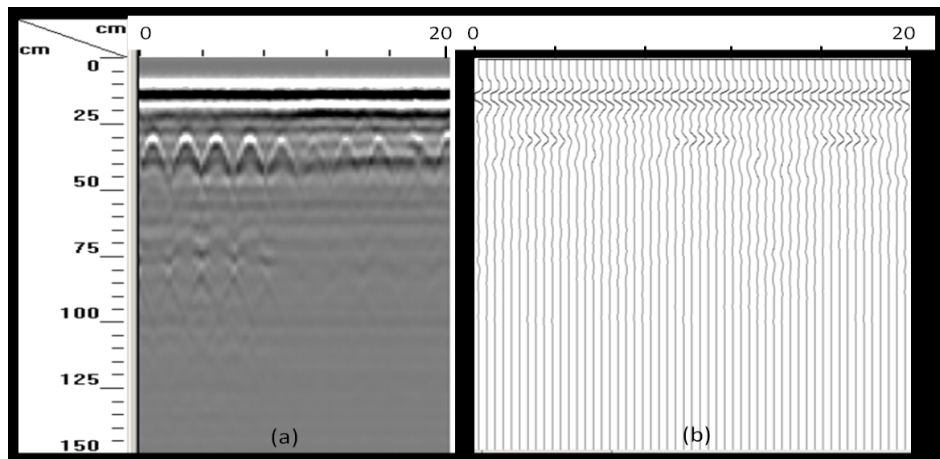


Figure 2-3 : Radargramme (2D scan) du Géoradar  
(a) avec association des couleurs (b) sans association des couleurs

Il est intéressant de savoir qu'il existe différents types de système Géoradar en fonction de type de signal émis. On peut distinguer :

- les radars impulsionnels caractérisés par un spectre de fréquence de pic  $f_c$  et de largeur de bande  $\Delta f$  ;
  - les radars à saut de fréquence dont la caractéristique est de produire des ondes d'égale énergie sur un intervalle discret de fréquence ;
  - les radars FM-CW « frequency modulated-continuous wave » dont la spécificité est de produire un signal dont le spectre varie dans le temps, et ainsi d'adapter de manière dynamique la résolution pour différents types de cible à différentes profondeurs.
- [Rejiba, 2002]

Généralement, l'émetteur et le récepteur du Géoradar partagent une électronique et une antenne commune. On parle alors de Géoradar monostatique. Mais il existe aussi des systèmes Géoradar où l'émetteur et le récepteur sont séparés ; on parle alors de Géoradar bistatique, ou même de configuration multistatique, si l'on a un émetteur et plusieurs récepteurs distincts.

Peut importe le type de Géoradar, l'allure des signaux est intrinsèquement liée aux contrastes de permittivités et de conductivités électriques des milieux auscultés qui sont hétérogènes, atténuants et dispersifs. Il est donc plus que nécessaire de comprendre les ondes électromagnétiques et de connaître les propriétés des matériaux qui affectent leur propagation.

## 2.3 Rappels de la théorie sur l'électromagnétisme

Le champ électromagnétique représente aux charges et aux courants, ce que le champ gravitationnel représente aux masses. Ainsi, de même que la présence d'une masse induit un champ gravitationnel, la présence d'une charge induit un champ électromagnétique [Rejiba, 2002]. Grâce aux travaux de Faraday, Ampère et Gauss, Maxwell a formulé les équations qui régissent la propagation du champ électromagnétique, en fonction des sources et des propriétés du milieu. Ces équations se présentent comme suit :

$$\nabla \times E(r, t) + \frac{\partial}{\partial t} B(r, t) = 0 \quad (2-1)$$

$$\nabla \times H(r, t) - \frac{\partial}{\partial t} D(r, t) - j(r, t) = 0 \quad (2-2)$$

$$\nabla \cdot B(r, t) = 0 \quad (2-3)$$

$$\nabla \cdot D(r, t) = \rho \quad (2-4)$$

avec

$$H(r, t) = \mu(r, t) * B(r, t) \quad (2-5)$$

$$D(r, t) = \varepsilon(r, t) * E(r, t) \quad (2-6)$$

où on a :

Le champ électrique  $E$

Le champ magnétique  $H$

Le déplacement électrique  $D$

La densité de flux magnétique  $B$

Le courant de conduction  $j$

La densité volumique des charges électriques  $\rho$

Dans le domaine temporel, la relation entre le champ électrique,  $e$  et le champ magnétique  $h$ , est donnée par les équations suivantes :

$$\nabla \times e + \frac{\partial}{\partial t} h = 0 \quad \text{et} \quad \nabla \times h - \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} e = \sigma e \quad (2-7)$$

Dans le domaine fréquentiel, ces équations deviennent :

$$\nabla \times E + i\omega\mu H = 0 \quad \text{et} \quad \nabla \times H - (i\omega\varepsilon + \sigma)E = 0$$

où  $\omega$  est la pulsation de l'onde (rad/s) égale à  $2\pi f$ ,  $f$  étant la fréquence

$\varepsilon$  est la permittivité électrique (F/m)

$\mu$  est la perméabilité magnétique du milieu (H/m)

$\sigma$  est la conductivité électrique du milieu (S/m).

Ces quatre derniers paramètres ( $\omega$ ,  $\varepsilon$ ,  $\mu$  et  $\sigma$ ) permettent de définir trois autres qui caractérisent les matériaux à savoir :

- Le coefficient d'atténuation,  $\alpha$  (Np/m),

$$\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon\mu c^2}{2} \left( -1 + \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\varepsilon\omega} \right)^2} \right)} \quad (2-8)$$

- La constante de phase  $\beta$  (rad/m)

$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon\mu c^2}{2} (1 + \sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\epsilon\omega})^2})} \quad (2-9)$$

Notons que la quantité  $(\frac{\sigma}{\epsilon\omega})$  varie selon le type de matériau :

Pour des matériaux diélectriques :  $(\frac{\sigma}{\epsilon\omega}) < 0,01$

Pour des matériaux peu conducteurs :  $0,01 < (\frac{\sigma}{\epsilon\omega}) < 100$

Pour des matériaux conducteurs :  $100 < (\frac{\sigma}{\epsilon\omega})$

- le facteur de qualité du milieu Q :

$$Q = \frac{\omega\epsilon}{\sigma} \quad (2-10)$$

Ce facteur permet de rendre compte de l'atténuation des ondes électromagnétiques qui ne dépend pas uniquement de la conduction mais aussi de la fréquence utilisée.

Comme nous le voyons dans les équations ci-dessus une onde électromagnétique et un milieu interagissent par l'intermédiaire de trois paramètres essentiels qui sont : la permittivité électrique  $\epsilon$ , la perméabilité magnétique  $\mu$  et la conductivité  $\sigma$ .

## 2.4 Facteurs affectant la propagation des ondes électromagnétiques

### 2.4.1 La permittivité électrique

On définit la permittivité électrique comme la capacité d'un matériau à se polariser sous l'effet d'un champ électrique. Lorsqu'un champ variable est appliqué, les particules constituant le matériau tendent à changer de position d'équilibre afin de compenser l'effet du champ. C'est la polarisation. Ce phénomène de polarisation se produit pendant un temps minimum donné. Ce temps est dit de «relaxation». Mais si le champ varie trop rapidement ce temps est très court et les particules n'ont pas le temps de se mouvoir.

Il existe quatre (4) principaux types de polarisation :

- La polarisation électronique : déformation du nuage électronique sous l'action d'un champ.
- La polarisation dipolaire ou d'orientation : les molécules dipolaires soumises à un champ voient l'axe de leur dipôle tenter de s'aligner avec ce dernier.
- La polarisation ionique : l'existence d'ions de signes contraires dans certains solides (NaCl) provoque des accumulations distinctes sous l'action d'un champ.
- La polarisation interfaciale ou polarisation de charges : une accumulation d'ions au niveau des interfaces dans un matériau hétérogène soumis à l'action d'un champ électrique.

Les gammes de fréquences auxquelles ces phénomènes prédominent sont présentées sur la figure 2-4 ci-dessous.

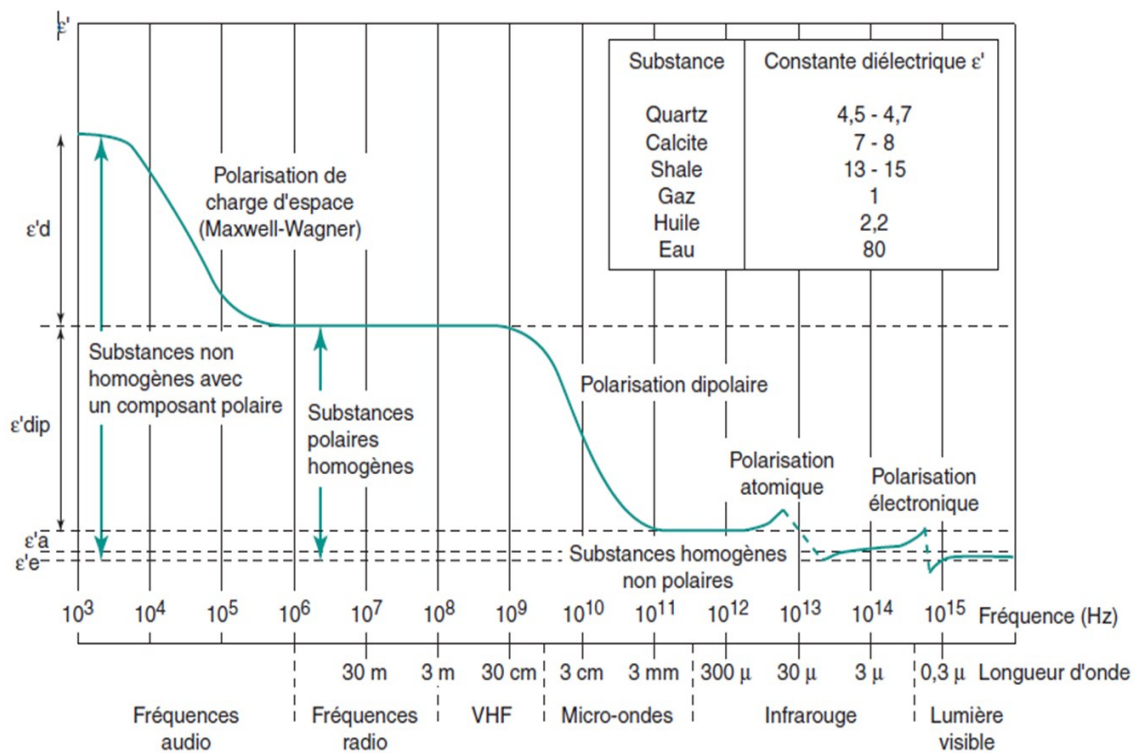


Figure 2-4 : Influence des différentes polarisations en fonction de la fréquence

[Tillard, 1991]

Dans le cas du GPR, c'est la polarisation dipolaire qui est prépondérante [Guegen et Palciauskas, 1992].

De façon mathématique la permittivité diélectrique s'exprime par la valeur :

$$\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \chi_e) \quad (2-11)$$

où  $\chi_e$  est la susceptibilité électrique

$\varepsilon_0$  est la permittivité diélectrique du vide

$\chi_e$  étant une valeur complexe il en résulte que  $\varepsilon$  est aussi complexe. C'est pour cela l'on peut l'exprimer sous la forme :

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2-12)$$

Où la partie imaginaire qui est négative traduit la perte d'énergie.

Les pertes d'énergie ne se traduisent pas seulement au niveau de la permittivité mais aussi au niveau de la conductivité des matériaux. En fait pour expliquer les pertes d'énergie, les deux mécanismes sont indissociables. Cela se traduit par l'équation du champ magnétique qui s'écrit alors comme suit :

$$\nabla \times H = j\omega (\varepsilon' - j\varepsilon'')E + \sigma E \quad (2-13)$$

Avec  $J = \sigma E$  la densité totale du courant dans le matériel. On obtient :

$$\nabla \times H = j\omega \left[ \varepsilon' - j \left( \varepsilon'' + \frac{\sigma}{\omega} \right) \right] E + \sigma E = j\omega \varepsilon' E + (\omega \varepsilon'' + \sigma) E \quad (2-14)$$

La quantité  $\varepsilon'' + \frac{\sigma}{\omega}$  est considérée comme la partie imaginaire de la permittivité effective, ou la quantité  $\omega \varepsilon'' + \sigma$  comme la conductivité effective totale.

La permittivité effective est rapportée à la permittivité du vide  $\varepsilon_0$  introduisant ainsi deux grandeurs relatives soient  $\varepsilon'_r$  et  $\varepsilon''_r$ , qui sont plus faciles à manipuler, car elles sont sans dimension ( $\varepsilon_0 = 8,854.10^{-12} F/m$ ). La partie réelle  $\varepsilon'_r$  est généralement appelée la constante diélectrique du matériau.

D'après Powers, la polarisation correspond à une accumulation de l'énergie électromagnétique (position intermédiaire des particules), mais lorsque ce phénomène dépend de la fréquence il s'accompagne de pertes par dissipation, la mesure de la quantité d'énergie accumulée lors de la polarisation définit alors la partie réelle de la permittivité diélectrique et les pertes par dissipation permettent de quantifier la partie imaginaire [Powers, 1997].

Dans la pratique la permittivité relative d'un milieu de propagation se traduit par sa constante diélectrique, qui est exprimée au moyen de l'équation suivante :



$$\varepsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (2-15)$$

(Ceci est effectif dans un milieu homogène avec une onde plane ou selon un mode de transition tel que les champs électrique et magnétique sont tous deux orthogonaux à la direction de propagation. On parle de mode TEM, traverse électrique-magnétique.)

Où « $c$ » est la vitesse de propagation de la lumière ( $3.10^8$  m/s) et « $v$ » est la vitesse de propagation dans le milieu (m/s). Ce paramètre adimensionnel contrôle principalement la vitesse des ondes électromagnétiques.

Le tableau 2-1 ci-dessous donne les valeurs indicatives de la constante diélectrique et de la vitesse de propagation pour les matériaux les plus rencontrés en génie civil.

Tableau 2-1 : Valeurs indicatives de la constante diélectrique et de la vitesse de propagation

[Loken, 2005]

Matériaux	constante diélectrique (sans unité)	vitesse de propagation (* $10^9$ m/s)
Air	1	0,30
Sol gelé	4	0,15
Granite	9	0,10
Calcaire	6	0,12
Grès	4	0,15
Sable sec	4 to 6	0,12 à 0,15
Sable humide	30	0,055
Argile sec	8	0,11
Argile humide	33	0,052
Asphalte	3 to 6	0,12 à 0,17
Béton	9 to 12	0,087 à 0,10
Eau	81	0,033
Acier	$\infty$	0

## 2.4.2 La perméabilité magnétique

Pour mieux comprendre la notion de perméabilité magnétique, il est bien de rappeler les observations de Faraday. Il a montré que toute substance est aimantable mais le plus souvent l'effet n'est appréciable que dans un champ magnétique intense. Et en plaçant dans un champ magnétique non uniforme des barreaux de substances différents on voit que :

- certains sont attirés vers les régions de champ intense en s'orientant parallèlement aux lignes de champ comme le ferait un barreau de fer doux.
- or d'autres sont repoussées vers les régions où le champ magnétique est faible et s'orientent perpendiculairement aux lignes de champ ; de telles substances sont dites *diamagnétiques* (argent, or, cuivre, mercure, plomb, presque tous les composés organiques...)

Ainsi les substances qui sont comparables au fer sont dites *ferromagnétiques* (fer, cobalt, nickel et un grand nombre de leurs alliages en particulier les aciers). Les substances qui subissent des actions de même nature que le fer mais beaucoup moins intenses sont dites *paramagnétiques* (aluminium, chrome, platine et certains composés d'éléments ferromagnétiques comme l'alliage fer et de nickel).

La perméabilité magnétique, permet alors de caractériser la faculté d'un matériau à modifier un champ magnétique. La perméabilité magnétique traduit l'appartenance d'un matériau à l'une (ou plusieurs) des classes de comportement vues plus haut.

Dans les matériaux naturels, on constate de plus une dépendance fréquentielle de la perméabilité magnétique donc une aptitude à perdre de l'énergie magnétique lors de l'application du champ d'excitation. Ce phénomène de perte peut être modélisé par une partie imaginaire de la perméabilité magnétique, comme il l'avait été pour la permittivité diélectrique pour les phénomènes de polarisation électrique.

La perméabilité magnétique exprime donc en d'autre terme, l'énergie stockée ou perdue dans le matériau suite aux phénomènes d'induction magnétique. Elle est donc similaire vis à vis de l'induction magnétique, à la permittivité vis à vis du déplacement de charge.

Mais de manière très pratique pour nous, force est de constater que la grande majorité des matériaux géologiques rencontrés ne réagissent que très faiblement à une excitation magnétique. Ainsi la perméabilité relative  $\mu_r$  sera souvent prise égale à 1 pour la plupart des matériaux géologiques.

En effet la perméabilité magnétique du matériau (perméabilité absolue  $\mu$  en  $\mu\text{H/m}$ ) est rapportée à celle du vide ( $\mu_0 = 1,256 \mu\text{H/m}$ ) comme le montre l'expression suivante pour avoir une perméabilité relative qui est sans dimension.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2-16)$$

### 2.4.3 La conductivité électrique

La conductivité électrique est une grandeur physique caractérisant la propagation, dans un milieu matériel, d'un flux d'électrons. Le courant de conduction, classiquement défini à partir du déplacement des charges libres dans le matériau, est proportionnel au nombre, à la charge et à la vitesse de ces derniers. Si un élément de surface  $dS$  normal au champ électrique est traversé pendant chaque unité de temps par un nombre de charges négatives  $n v_{dn} dS$  et par un nombre de charges positives  $p v_{dp} dS$ , alors la densité  $J_c$  (par unité de surface) de courant de conduction peut être s'exprimée par :

$$J_c = qp v_{dp} + (-q)n v_{dn} \quad (2-17)$$

La conductivité est définie par la loi d'Ohm par l'équation suivante :

$$J_c = \sigma E \quad \text{Loi d'Ohm} \quad (2-18)$$

En exprimant les vitesses de dérive  $v_{dp}$  et  $v_{dn}$  en fonction du champ électrique ( $v = \mu E$ )

on obtient :

$$\sigma = q (n\mu_n + p\mu_p) \quad (2-19)$$

où  $J_c$  est la densité de courant de conduction, (A/m<sup>2</sup>)

$E$  est le champ électrique, (V/m)

$\sigma$  est la conductivité électrique, (S/m)

La conductivité peut être aussi vue comme étant la quantité d'énergie mise en œuvre lors du transport de charges libres. Lors de l'application d'un champ variable, il est impossible de distinguer concrètement la part de la permittivité et de la conductivité dans le stockage d'énergie d'une part et dans les pertes d'autre part. Aussi, il est considéré pour le géoradar que les conductivités sont indépendantes de la fréquence. Elles sont considérées comme purement réelles, n'ayant donc aucunes parties imaginaires [Rejiba, 2002].

## 2.5 Propriétés des ondes électromagnétiques

Hormis toutes considérations purement théoriques, nous présenterons ici les propriétés fondamentales des ondes que nous jugeons être essentielles pour notre étude à savoir : la fréquence, la vitesse de propagation, l'atténuation, l'absorption et la réflexion.

### 2.5.1 La fréquence

La définition de la fréquence se retrouve dans la nature même des ondes. En effet, une onde électromagnétique est la propagation, d'une déformation harmonique des propriétés électriques et magnétiques de l'espace, à une certaine vitesse. On peut aussi définir une onde par sa fréquence, c'est-à-dire le rapport entre sa vitesse et sa longueur d'onde.

Ainsi le spectre électromagnétique (figure 2-5) présente une classification par domaine des différents types de radiations. Il montre également que des ondes radio vers les rayons gamma, la longueur d'onde devient plus courte, la fréquence augmente (les oscillations nécessaires pour les produire deviennent plus rapides), et l'énergie devient plus élevée (cela demande plus d'énergie pour produire des rayons gamma que cela n'en demande pour les ondes radio).

En effet, la longueur d'onde  $\lambda$  (m) peut être exprimée en fonction de la vitesse  $v$  (m/s) et de la fréquence  $f$  (Hz) grâce à l'équation :

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2-20)$$

Les systèmes radar qui existent depuis le début les années 1970 utilisent des antennes à fréquence centrale inférieure au gigahertz. C'étaient des radars impulsionnels. Diverses études ont montré leur faible niveau de résolution pour l'auscultation des structures en béton armé précontraint et des chaussées [Bungey, 2004] et [Fauchard, 2001]. Pour améliorer leur résolution, les systèmes GPR ont évolué en termes de fréquence centrale et de largeur de bande, mais également en termes de technologie, avec l'apparition du radar à sauts de fréquences. Ils permettent de travailler jusqu'à des fréquences centrales de 10 GHz [Bungey, 2004]. Mais dans la pratique les Géoradars ne dépassent pas souvent une fréquence de 2,5 GHz. Dans notre étude le système radar étant un système commercialisé, le choix des fréquences d'antennes à notre disposition est limité à celui proposé par les compagnies fabricantes. Ainsi, nous aurons à notre disposition des antennes de 200, 400, 600, 900 et 2000 MHz.

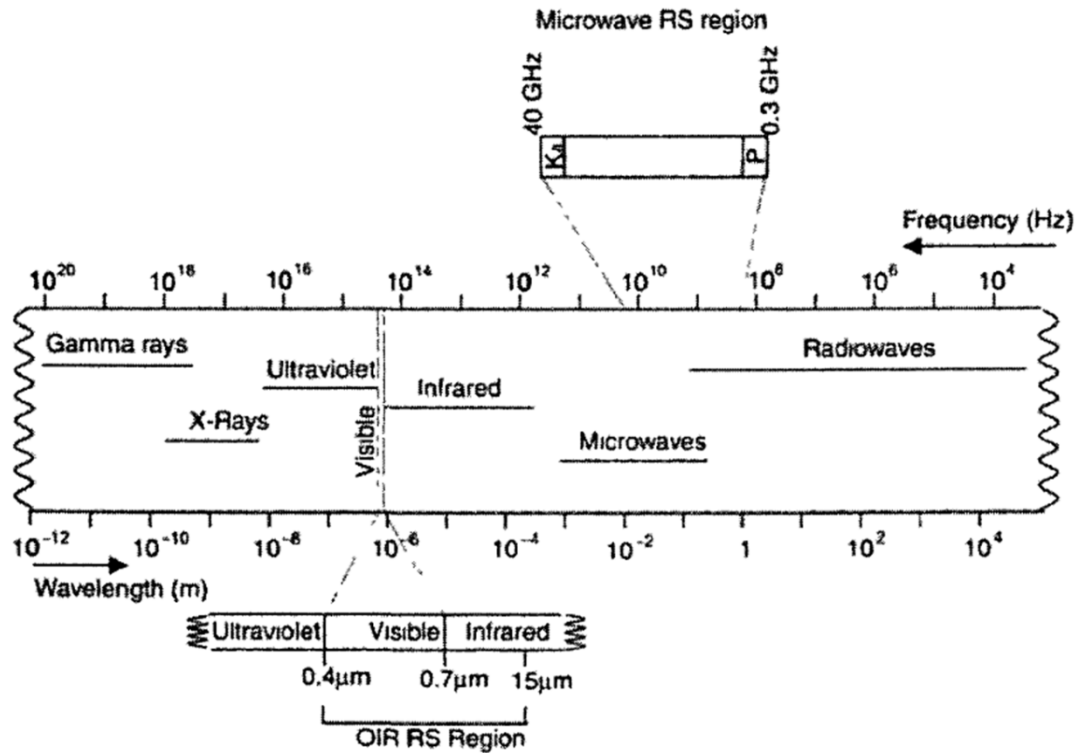


Figure 2-5 : Spectre électromagnétique [Joseph, 2005]

## 2.5.2 La vitesse de propagation

La vitesse de la lumière qui est une onde électromagnétique dans le vide est de  $3 \times 10^8$  m/s.

Dans tout autre milieu, la vitesse de propagation d'une onde électromagnétique décroît et la décroissance est fonction du milieu. Ainsi comme nous l'avons vu plus haut, la vitesse de propagation du signal radar dans un milieu peut être estimée en connaissant le constant diélectrique relatif de ce milieu, grâce à la relation suivante :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (2-21)$$

où  $v$  est la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le milieu (m/s) ;

$c$  est la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le vide (m/s) ;

$\epsilon_r'$  est la constante diélectrique relative du milieu (sans unité).

Ceci permet de comprendre que la vitesse des ondes radar dans un milieu plus humide est plus faible, car la constante diélectrique de ce milieu plus humide est plus élevée. Donc pour une même épaisseur de matériau, le temps de propagation dans le milieu plus humide est plus

élevé. De façon plus succincte, si la constante diélectrique du matériau augmente, le temps de propagation dans celui-ci augmente aussi.

Dans le cas spécifique du béton, il a été montré que la teneur en eau affectait fortement la valeur de la constante diélectrique. La constante diélectrique d'un béton saturé peut être deux fois plus élevée que celle d'un béton sec. Comme nous le voyons dans le tableau 2-2 ci-dessous un béton sec peut avoir une constante diélectrique de 5 alors qu'un béton saturé une valeur de 12.

Tableau 2-2 : Différentes valeurs courantes de la constante diélectrique des bétons [Laurens, 2001]

Constante diélectrique $\varepsilon'_r$	Vitesse $v$ (*10 <sup>9</sup> m/s)
Air - 1	0,30
Bétons secs - 5	0,13
6	0,12
7	0,11
8	0,11
9	0,10
10	0,095
11	0,090
Bétons saturés - 12	0,087
Eau - 81	0,01

### 2.5.3 L'atténuation et l'absorption

Dans le vide, au fur et à mesure qu'une onde électromagnétique s'éloigne de sa source, son amplitude diminue. Cette décroissance est due à la dispersion spatiale. Cela se traduit aisément par l'expression de la densité de puissance qui est inversement proportionnelle à la distance parcourue.

$$E = \frac{P}{4\pi d^2} \quad (2-22)$$

où  $E$  est la densité de puissance du flux ( $\text{W/m}^2$ )

$P$  est la puissance du flux ( $\text{W}$ )

$d$  est la distance parcourue ( $\text{m}$ )

Ainsi, on peut définir un terme appelé « *atténuation de parcours en espace libre* » ou en anglais « *Path loss* ». Ceci représente les pertes dues à la dispersion de l'onde le long du trajet.

$$P \text{ Loss} = 10 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (2-23)$$

où  $P \text{ Loss}$  en dB ;  $d$  est la distance en mètres et  $\lambda$  est la longueur d'onde en mètres.

Dès lors que l'on quitte le vide, l'atténuation croît par absorption. L'onde électromagnétique qui voyage rencontre des électrons qu'elle va exciter. Ceux-ci vont réémettre à leur tour du rayonnement mais ce processus ne s'effectue pas sans perte et le rendement est inférieur à 1.

L'atténuation des signaux du Géoradar, qui se traduisent par une baisse d'amplitude fournit des informations importantes (absorption, dispersion) sur la propagation des ondes dans le milieu. Ces informations permettent alors d'avoir une interprétation globale de la structure étudiée.

Il existe diverses causes d'atténuation des ondes électromagnétiques : l'effet d'absorption (conductivité et pertes diélectriques), la perte par radiation et l'effet de diffusion.

Dans notre étude l'un des éléments les plus atténuants sera la couche de roc au-dessus de la dalle. En effet, l'étude de Wunderlich montre bien qu'il existe un lien entre le type d'argile sa teneur en eau et l'atténuation des ondes du Géoradar. Grâce à un facteur  $Q$  de qualité qui est déterminé à partir de la comparaison des amplitudes des ondes directes et réfléchies, il classifie les sols par niveau d'atténuation. La comparaison des sols avec différentes teneurs en argile a montré que le facteur de qualité diminue avec l'augmentation de la teneur l'argile et également avec l'augmentation de la teneur en eau [Wunderlich et Rabbel, 2011].

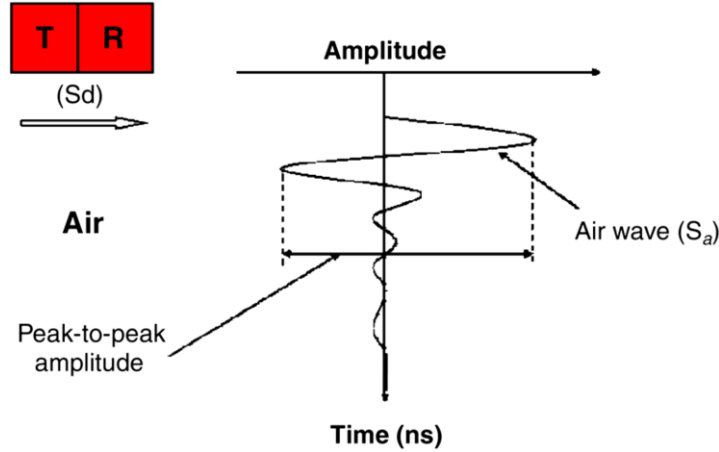


Figure 2-6 : Signal de l'onde directe d'un Géoradar à antennes émettrice et réceptrice couplées [Sbartai *et al.*, 2007]

L'atténuation ( $A$ ) du signal du Géoradar est donnée par la formule :

$$A = -20 * \log \frac{A_b}{A_a} \quad (2-24)$$

où  $A_a$  est l'amplitude de l'onde «*amplitude crête à crête*» enregistrée dans la béton

$A_b$  est l'amplitude de l'onde directe «*amplitude crête à crête*» dans l'air (figure 2-6)

L'absorption traduit la perte par conductivité effective alors que, la perte par radiation résulte de la divergence du front d'onde généré par l'antenne émettrice.

La diffusion est due à l'existence des diffractions du rayonnement sur les hétérogénéités avec une longueur d'onde comparable à celle de l'onde émise. Cette dernière peut être évaluée en comparant la longueur d'onde de rayonnement avec la dimension des plus grosses inclusions.

Il existe alors deux cas basés sur la relation suivante [Laurens, 2001]:

$$l \leq k^{-1} = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2-25)$$

- Si la dimension des inclusions  $l$  est inférieure à la longueur d'onde  $\lambda$ , le phénomène de diffusion est négligeable.
- Si la dimension des inclusions est comparable ou dépasse la longueur d'onde des rayonnements, la permittivité est calculée à partir des théories de multidiffusions.

La relation précédente permet alors de fixer une limite aux hétérogénéités. Pour une hétérogénéité donnée, on fixe la limite supérieure de la longueur d'onde. Par exemple, pour un béton humide de constante diélectrique égale à 9 ausculté avec une antenne de fréquence



centrale de 1,5 GHz, l'approche quasi-statique sera valable jusqu'à une dimension de granulat de 14,2 mm. Au-delà de cette valeur, des pertes par diffusion apparaîtront [Dous, 2008].

#### 2.5.4 La réflexion

Toute onde électromagnétique peut être réfléchiée totalement ou en partie. C'est grâce à cette propriété que nous pouvons nous voir les uns les autres et voir les objets qui nous entourent. Pour quantifier la réflexion, on utilise un coefficient appelé coefficient de réflexion.

Le coefficient de réflexion quantifie la modification d'amplitude subie par le champ électromagnétique lorsque celui-ci rencontre une interface entre deux matériaux. En effet, lorsqu'une onde électromagnétique rencontre une frontière entre 2 matériaux présentant des propriétés physiques différentes, une partie est transmise et réfractée et une autre partie est réfléchiée.

La loi de Snell-Descartes qui est la base pour l'expression des phénomènes de réflexion des ondes, ne dépend pas de l'orientation du champ électrique par rapport à l'interface. Cependant, pour étudier des phénomènes comme l'amplitude des ondes réfléchiée et transmise, il faut préciser les directions des champs électrique et magnétique associées à l'onde incidente. Traditionnellement, on caractérise l'onde par rapport à son champ électrique. On doit alors considérer les différentes orientations possibles. On sait que les champs d'une onde plane doivent rester dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Ce plan est défini par les deux directions : celle perpendiculaire au plan d'incidence (polarisation perpendiculaire) et celle contenue dans le même plan (polarisation parallèle). Mais le champ électrique associé à l'onde incidente peut avoir aussi des composantes selon ces deux directions. Donc en étudiant ces deux cas individuellement, l'on peut en déduire les autres.

Pour une polarisation perpendiculaire on peut retenir les expressions suivantes :

$$R = \frac{\frac{n_2}{\cos\theta_t} - \frac{n_1}{\cos\theta_{in}}}{\frac{n_2}{\cos\theta_t} + \frac{n_1}{\cos\theta_{in}}} \quad \text{et} \quad T = \frac{\frac{2n_2}{\cos\theta_t}}{\frac{n_2}{\cos\theta_t} + \frac{n_1}{\cos\theta_{in}}} \quad (2-26)$$

$$\text{On définit } \frac{n_1}{\cos\theta_{in}} = Z_1 \text{ et } \frac{n_2}{\cos\theta_t} = Z_2 \text{ avec } n_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}}$$

Où  $\epsilon_i$ ,  $\mu_i$  et  $Z_i$  sont respectivement la permittivité, la perméabilité et l'impédance du milieu  $i$ .

$\theta$  est l'angle d'incidence [Van der Wielen *et al.*, 2011]

Pour une polarisation parallèle on retient que :

$$R = \frac{n_2 \cos \theta_t - n_1 \cos \theta_{in}}{n_2 \cos \theta_t + n_1 \cos \theta_{in}} \quad \text{et} \quad T = \frac{2n_2 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_t + n_1 \cos \theta_{in}} \quad (2-27)$$

On définit ici  $n_1 \cos \theta_{in} = Z_1$  et  $n_2 \cos \theta_t = Z_2$

Que la polarisation soit parallèle ou perpendiculaire on peut voir que les coefficients de réflexion et de transmission s'expriment dans le cas d'une incidence normale comme suit :

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{et} \quad T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2-28)$$

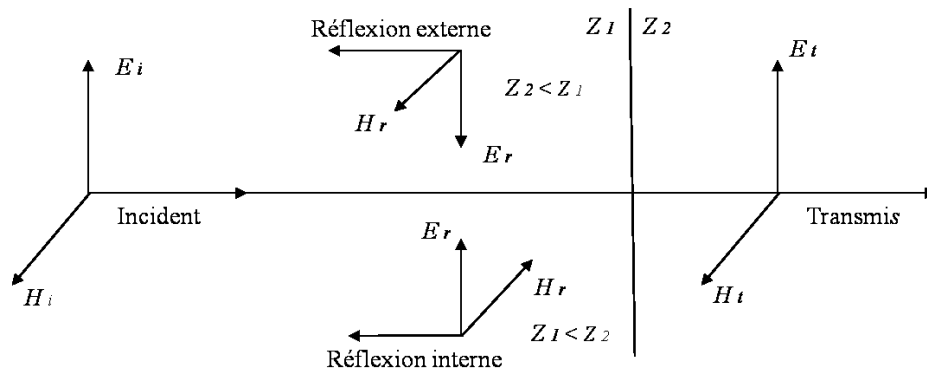


Figure 2-7 : Réflexion des ondes électromagnétiques [Pain, 2005]

Ainsi, si l'amplitude du champ incident est  $I$  alors l'amplitude du signal réfléchi est  $RI$  et celui du signal transmis  $TI$ .

## 2.6 Causes de dégradation des dalles en béton armée

Il existe plusieurs causes de dégradation du béton armé qui peuvent être classifiés en 3 ordres : mécanique, physique et chimique.

Au nombre des causes mécaniques, nous pouvons citer :

- l'abrasion : usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc.
- l'érosion : perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement.

- les chocs : le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage, des outils.
- les surcharges : il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton.
- la cavitation : usure d'une structure hydraulique caractérisée par une perte de masse en présence de bulbes de vapeur qui se forment lors d'un changement brusque de direction d'un écoulement rapide de l'eau.

Comme causes physiques nous pouvons lister :

- le feu : les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton.
- les cycles de gel/dégel : après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides.

Pour ce qui est des causes chimiques nous pouvons citer :

- les réactions alcali-granulats : réactions qui se produisent entre la solution interstitielle du béton, riche en alcalin et certains granulats lorsqu'ils sont placés dans un environnement humide. Des gels gonflants apparaissent en développant des microfaiençages et un éclatement du béton.
- les réactions sulfatiques : les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : l'étringite, le gypse et la thaumasite. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations.
- la corrosion : attaque des matériaux par les agents chimiques. Sur les métaux, la corrosion est une oxydation.

Nous avons différentes causes de dégradations des structures en béton, mais les pathologies visibles ne se résument souvent qu'à : la fissuration, le délaminage et l'exsudation de gel blanchâtre. Ainsi, en regardant le mécanisme des agents à l'origine des autres types de dégradation susceptible d'affecter les dalles enterrées, nous pouvons les regrouper en deux catégories principales :

- les agents qui créent des produits expansifs dans le béton et le fissurent, à savoir les attaques sulfatiques et les réactions alcalis-granulats.
- et ceux qui non seulement créent des produits expansifs mais ont aussi la particularité de détruire le film de passivité des armatures pour entraîner leur corrosion, à savoir la carbonatation et l'attaque par les chlorures.

Nous essayerons maintenant de voir ces mécanismes d'une plus ample manière.

### **2.6.1 La corrosion des armatures dans le béton**

La corrosion correspond à la formation d'oxydes de fer suite à des réactions électrochimiques en présence d'un agent agressif comme les ions chlores. Le volume de ces produits de corrosion étant 2 à 6 fois supérieur à celui du métal [Metha, 1986], ils créent une contrainte d'expansion qui fissure le béton lorsqu'elle est plus élevée que la résistance en traction de celui-ci. Ces fissures vont accélérer la pénétration des espèces agressives et de ce fait le processus de corrosion. Outre l'expansion, la corrosion des aciers entraîne aussi une diminution de la section des barres en acier. Cette diminution de section s'accompagne d'une diminution de la résistance mécanique de la structure ce qui est très préjudiciable pour l'exploitation future de la structure.

Du fait de sa basicité (pH environ de 13), le béton sain protège les armatures autour desquelles se forme un film passif (couche d'oxyde) [Broomfield, 2007]. La pénétration dans le béton des ions chlores ou du dioxyde de carbone (carbonatation) provoque la chute du pH du béton, le rendant plus acide pour les armatures. Ceci entraîne la destruction du film passif des armatures et l'amorçage d'une corrosion localisée qui s'étend à l'ensemble de la barre lentement. Il s'agit de la formation et de la croissance de la rouille, produit expansif qui peut ensuite faire fissurer le béton.

Le processus électrochimique correspondant à la formation de la rouille peut être décrit comme suit : lorsque l'on place de l'acier dans une solution aqueuse, des atomes de fer entrent en solution sous forme d'ions de fer ( $Fe^{2+}$ ). À l'anode des électrons négatifs se dégagent ( $2e^-$ ). En présence d'oxygène dans le milieu aqueux, à la cathode se forme de l'hydroxyle ( $OH^-$ ) grâce aux électrons qui se libèrent lorsque le fer entre en solution. Ensuite les hydroxyles réagissent avec les ions de fer et forment l'hydroxyde de fer ( $Fe(OH)_2$ ) qui précipite et se transforme, par réaction avec l'oxygène, en oxyde de fer (rouille) [Broomfield, 2007].

L'hydroxyde de fer ( $Fe(OH)_2$ ) est stable en milieu basique et contribue à protéger l'armature en formant une couche passivante. Mais les ions chlorures perforent cette couche par formation d'un complexe  $FeCl^+$ . On parle alors de corrosion par pénétration des ions chlorures. Les ions  $Cl^-$  proviennent essentiellement de l'apport extérieur des sels de déglacage. Cependant les ions  $Cl^-$  peuvent aussi provenir de l'utilisation pour la fabrication du béton de granulats marins et/ou d'accélérateur de prise du type ( $CaCl_2$ ) à une certaine concentration. La figure 2-8 ci-dessous donne une idée de ce qui se passe dans le béton armé.

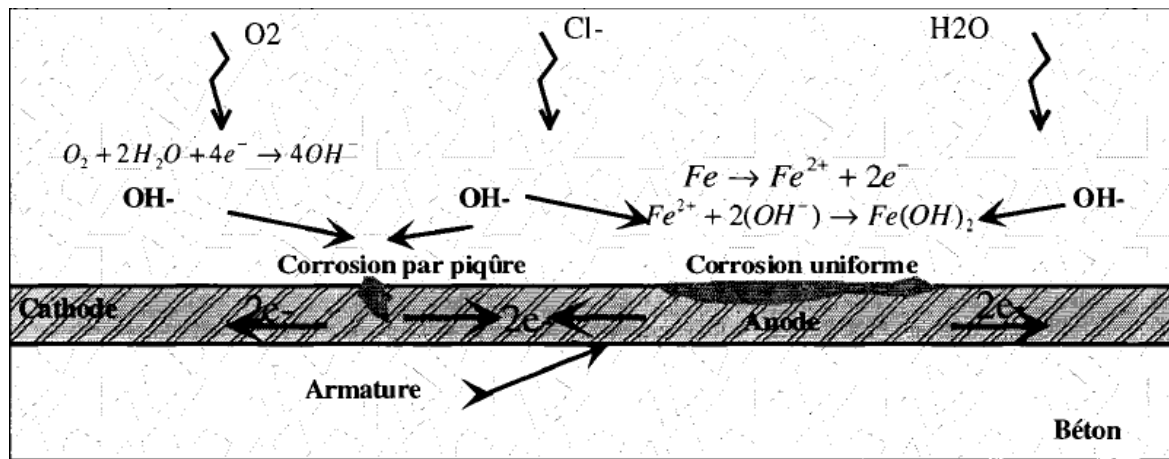
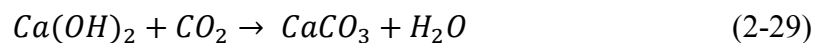


Figure 2-8 : Mécanismes de la corrosion [Dous, 2008]

La corrosion par carbonatation est engendrée par une réaction entre le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) de l'air et la portlandite ( $Ca(OH)_2$ ). Le résultat de cette réaction étant la formation des carbonates de calcium ( $CaCO_3$ ) suivant la réaction :



Le dioxyde de carbone est dissout et réagit avec la solution interstitielle basique du béton, diminuant ainsi son pH [Neville, 1995]. Le pH peut chuter jusqu'à une valeur de 9 et atteindre l'armature, qui est alors dépassivée. Il s'enclenche alors le processus de corrosion vu plus haut.

## 2.6.2 Les réactions sulfatiques et alcali-granulats dans le béton

Les réactions sulfatiques regroupent l'ensemble des réactions faisant intervenir des sulfates ( $SO_4^{2-}$ ). Ces réactions sulfatiques sont principalement responsables de la formation de deux composés : l'ettringite et la thaumasite. Ces produits sont très expansifs, ils gonflent dans le béton durci et en provoquent la fissuration (figure 2-9).

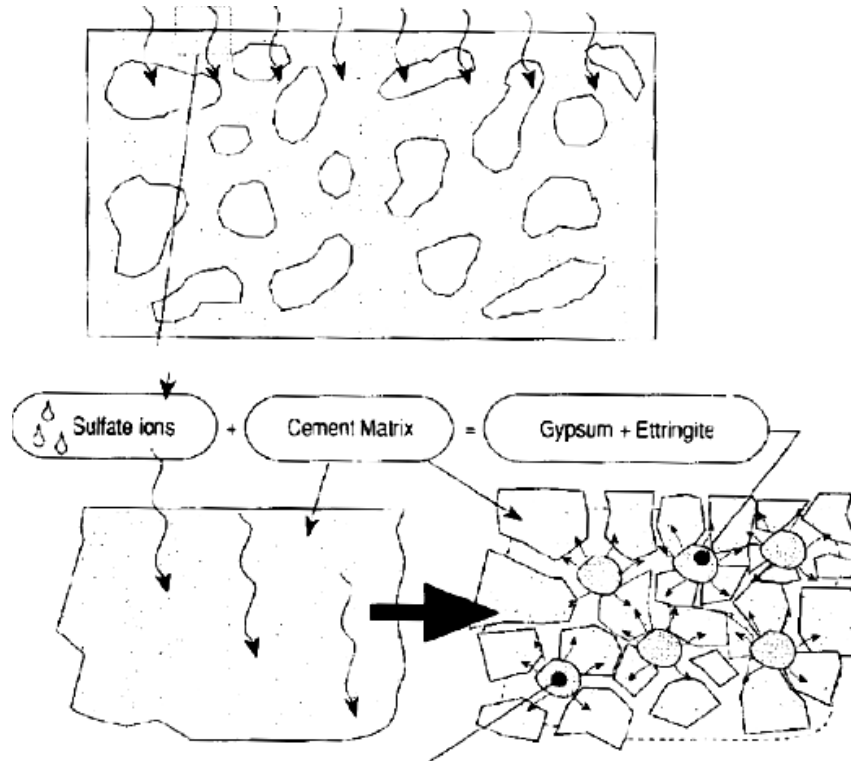
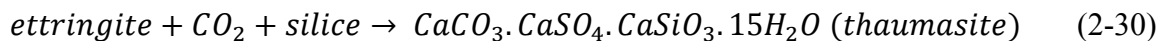
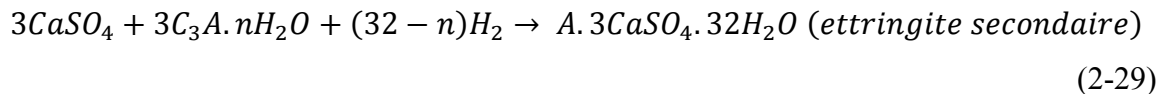
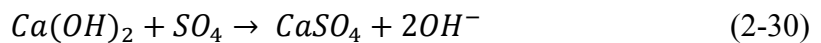


Figure 2-9 : Réactions sulfatiques [Courard, 2010]

Les réactions qui expliquent la formation l'ettringite et la thaumasite sont :



Les sources externes de sulfates peuvent être les infiltrations dans le sol des eaux de certaines nappes phréatiques ou le charriage de matières organiques en décomposition.

Les réactions alcalis-granulats sont des réactions qui se produisent entre certaines formes de silice amorphes ou mal cristallisés et des alcalis comme le sodium (Na) et le potassium (K), qui sont présents dans le ciment ou apportés par des sources extérieures. Les alcalins réagissent avec les granulats du béton (sous réserve qu'ils soient réactifs, qu'il y ait suffisamment d'alcalins et qu'il y ait une quasi saturation en humidité des porosités dans le béton). On dénombre 3 principaux types d'alcali réactions :

- la réaction alcali-carbonate,
- la réaction alcali-silice,

- et la réaction alcali-silicate.

Mais la réaction la plus courante est la réaction alcali-silice. Ces différentes réactions se traduisent par une réduction des propriétés mécaniques du béton ainsi qu'une apparition de fissures (formation de produits expansifs due aux pressions de cristallisation). En effet, la réaction alcali-granulats produit un gel de silicates alcalins qui est fortement expansif. Si le béton présente une résistance à la traction insuffisante, des fissures vont apparaître. Il faut aussi un taux d'humidité élevé pour que cette réaction se déroule. En effet, les alcalins doivent être transportés par l'eau. Les conditions les plus propices à l'apparition de cette réaction correspondent à un taux d'humidité de l'ordre de 80% [Courard, 2010].

Généralement, les bétons concernés par cette pathologie sont constitués par des granulats siliceux ainsi que certains calcaires silicifiés. Le problème peut aussi provenir de silex qui seraient présents dans le sable [Mommer *et al.*, 2004] .

## **2.7 Détection des dégradations du béton avec le Géoradar**

### **2.7.1 Principe de détection des anomalies**

Comme nous l'avons énoncé plus haut, le principe de la détection par Géoradar consiste à émettre une onde électromagnétique à partir d'une interface, à détecter et ensuite analyser les réflexions de ces ondes provenant des diverses interfaces du système étudié. Dans le cas d'une dalle en béton armé, l'analyse de ces réflexions permet de mettre en évidence les aciers d'armature, d'identifier des zones altérées ou fissurées, ou encore d'évaluer l'épaisseur d'une couche de béton (figure 2-10).

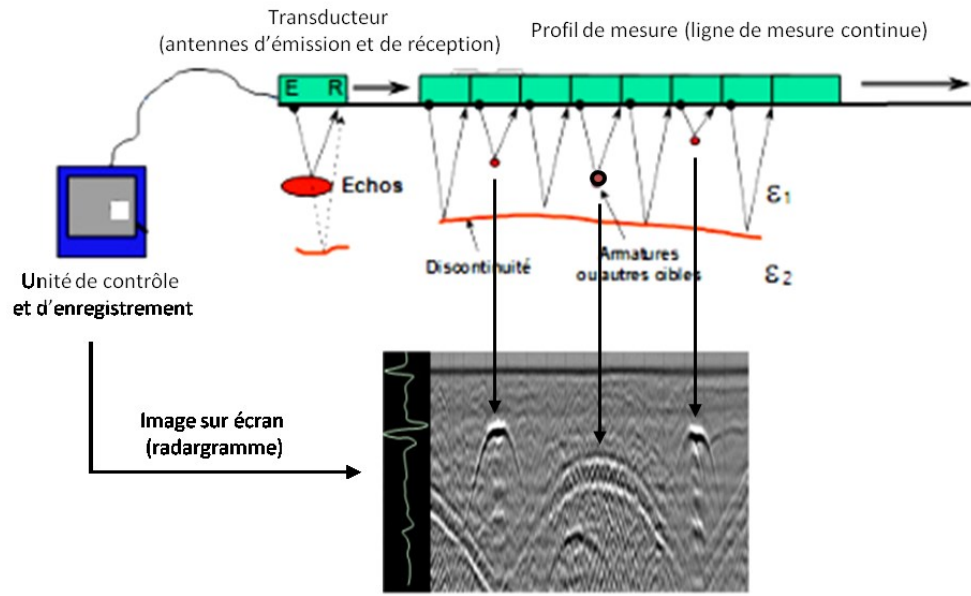


Figure 2-10 : Principe du Géoradar pour l'auscultation de dalle en béton armé

La principale cause de dégradation des dalles en béton armé est la corrosion des barres d'armature. Les facteurs prédominants pour initier et accélérer la corrosion sont l'humidité (présence d'eau) et la présence d'agent capable de dépasssiver les armatures comme les ions chlores ou le dioxyde de carbone. La présence de ces facteurs dans le béton modifie ces propriétés physiques surtout ces propriétés électromagnétiques, à savoir sa conductivité et sa permittivité diélectrique. C'est la variation de ces propriétés électromagnétiques dans le béton qui est enregistrée par le Géoradar et permet de statuer sur son état.

Deux principales approches ont été utilisées pour évaluer l'état de dégradation des dalles en béton armée pour ce qui est de la corrosion. Conformément à l'article de Sbartaï, nous pouvons évoquer [Sbartaï *et al.*, 2007] :

- L'évaluation de l'état de corrosion par la detection des fissures et des délaminations dans le béton créées par l'expansion de la rouille (Büyükköztürk et Rhim, 1996; Halabe et al., 1996; Huston et al., 2000). Cette méthode n'est effective seulement que pour des cas de détérioration avancée de la structure.
- L'évaluation de l'état de corrosion en se basant sur la sensibilité du Géoradar à la variation du taux d'humidité et de la conductivité du béton. Comme nous l'avons vu, la propagation des ondes électromagnétiques dans un matériau est gouvernée par sa permittivité et sa conductivité. Or ces propriétés sont fortement influencées par la



teneur en eau (Soutsos et al., 2001) et la présence des ions chlores (Al-Qadi et al., 1997; Robert, 1998). En se basant sur ce principe, les variations de l'amplitude du signal entre les interfaces asphalte-béton et béton-armature ont été utilisées pour rendre compte de la probabilité de corrosion au niveau des dalles de pont (Narayanan et al., 1998; Laurens et al., 2000). L'atténuation de l'amplitude du signal au niveau des interfaces de réflexion corrèle parfaitement avec l'état physique du béton, à savoir la présence d'eau dans le béton (Laurens et al., 2002; Klysz et al., 2004; Sbartaï et al., 2006) et la présence d'ions chlores (Sbartaï et al., 2006). Mais cette approche n'est valable que s'il existe la présence des interfaces de réflexions.

Cette dernière approche a été utilisée et comparée avec succès à la technique de résistivité électrique [Sbartaï *et al.*, 2007] et à la technique du potentiel de corrosion [Laurens, 2001]. Il ressort de ces deux dernières études que le Géoradar constitue un bon instrument pour évaluer la probabilité de corrosion au niveau des dalles en béton armé. L'étude de l'atténuation du signal radar est l'élément clé de la technique Géoradar. En effet plus le béton est humide ou plus il contient d'ions chlores, plus l'atténuation du signal radar est grande. C'est donc cette approche que nous utiliserons pour notre étude, à la différence que nos dalles sont enterrées.

### **2.7.2 Avantages et limites de la technique RADAR**

Le Géoradar est un outil d'auscultation non destructif très prisé pour de grandes surfaces d'investigation, surtout pour sa rapidité d'exécution et son aisance d'utilisation. Une des choses très intéressantes avec le Géoradar est qu'il permet d'avoir un très bon visuel de notre structure avec une image 2D obtenue en temps réel, mais aussi permet une reconstitution en image 3D assez précise de la structure auscultée. Le Géoradar se comporte aussi très bien avec des objets métalliques ou non métalliques, il est capable de détecter des hétérogénéités, un vide, ou encore des délaminations [IAEA, 2002]. La capacité à pouvoir répondre à plusieurs autres problématiques grâce au Géoradar comme l'évaluation des épaisseurs de couche, l'évaluation de la teneur d'humidité dans le béton, fait du Géoradar un outil intéressant.

Mais le fait que l'interprétation des données dépend de l'expérience de l'utilisateur rend la technique moins uniformiste. Aussi, le fait que la dispersion d'énergie transmise provoquée par les barres de renforcements réduisant la profondeur de pénétration limite les performances du

Géoradar. Le tableau 2-3, ci-dessous, présente un récapitulatif des différents avantages et limites du radar.

Tableau 2-3 : Avantages et limites du Géoradar [IAEA, 2002]

Avantages	Limites
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilité d'ausculter rapidement et efficacement de larges surfaces.</li> <li>• Ne nécessite pas de couplant.</li> <li>• Essai complètement non destructif.</li> <li>• Profil de la structure immédiat sous la forme d'un radargramme.</li> <li>• Possibilité d'enregistrement des signaux et des radargrammes.</li> <li>• Sensible aux changements de matériau et aux caractéristiques mécaniques incluant le taux d'humidité.</li> <li>• Ne nécessite pas de mesures de sécurité particulières</li> <li>• Les équipements sont portables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipement spécialisé nécessaire pour l'auscultation.</li> <li>• L'interprétation des radargramme est parfois difficile et demande de l'expérience.</li> <li>• Un compromis est souvent nécessaire entre la résolution et la pénétration.</li> <li>• Les ondes ne peuvent pas pénétrer le métal ou d'autres matériaux très conducteurs.</li> <li>• Les performances peuvent être affectées par différentes caractéristiques des matériaux.</li> <li>• Cette technique est encore méconnue de l'industrie</li> </ul>

# CHAPITRE 3 SIMULATIONS NUMÉRIQUES

## 3.1 Introduction

Dans cette première partie de notre projet, nous avons réalisé des simulations numériques afin de se faire une idée de la manière dont le géoradar est susceptible de se comporter dans le cadre de notre problématique.

Dans un premier temps nous voulions savoir, si dans des conditions physiques parfaitement définies, un géoradar équipé avec des antennes de différentes fréquences centrales, à savoir 200 MHz, 400 MHz, 600 MHz et 900 MHz, peut permettre de localiser une dalle enfouie sous une certaine épaisseur de remblai.

Dans un second temps, établir quelles sont les limites de l'approche présentée pour résoudre notre problématique. Il était alors important de voir quelle interface de réflexion, permettait de rendre compte de la dégradation de la dalle de béton, et quelle était la signature d'une dégradation sur un radargramme.

Les simulations numériques ont été réalisées avec le logiciel REFLEXW. Ce logiciel permet de simuler la propagation des ondes électromagnétiques avec des fréquences diverses à travers des couches de matériaux différents définis par leurs propriétés électromagnétiques. Il est donc possible avec REFLEXW de produire un radargramme représentant un relevé géoradar effectué sur une ligne d'une dalle enfouie sous un type de sol donné.

## 3.2 Approche proposée

Le principe de la détection par Géoradar des zones de béton désagrégé dans les dalles souterraines est donné à la Figure 3-1 ci-dessous. Cela consiste à transmettre une onde électromagnétique à partir de la surface et à détecter les réflexions de ces ondes provenant de l'interface remblais-béton (réflexion sur l'extrados) et de l'interface béton-air (réflexion sur la face inférieure des dalles (intrados). La mesure du décalage temporel entre ces deux réflexions permet par la suite de déterminer la variation de l'épaisseur de la dalle, qui lui est proportionnelle.

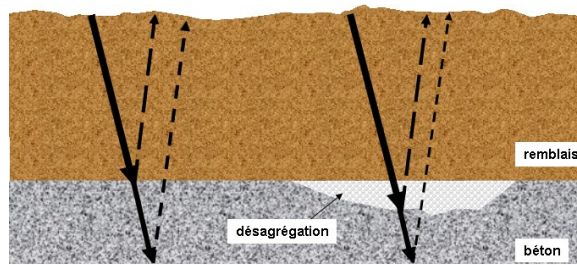


Figure 3-1: Principe de l'auscultation des dalles par Géoradar

De manière plus détaillée, cela consiste à transmettre une onde électromagnétique à partir de la surface et à détecter les réflexions provenant de différentes interfaces, comme l'indiquent les figures suivantes :

1. Interface remblais-béton (réflexion sur l'extrados de la dalle)
2. Interface béton-armature supérieure
3. Interface béton désagrégé-béton sain
4. Interface béton-armature inférieure
5. Interface béton-air (réflexion sur l'intrados de la dalle).

Les principales activités du projet de recherche consisteront à déterminer lesquelles des réflexions citées ci-dessus permettent de détecter la désagrégation du béton et d'évaluer son épaisseur.

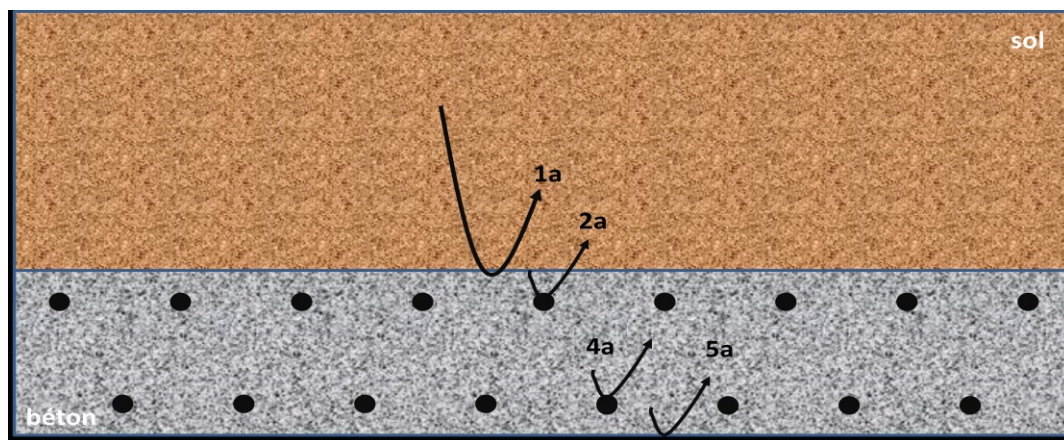


Figure 3-2 : Différentes réflexions dans le cas d'un béton sans dégradation

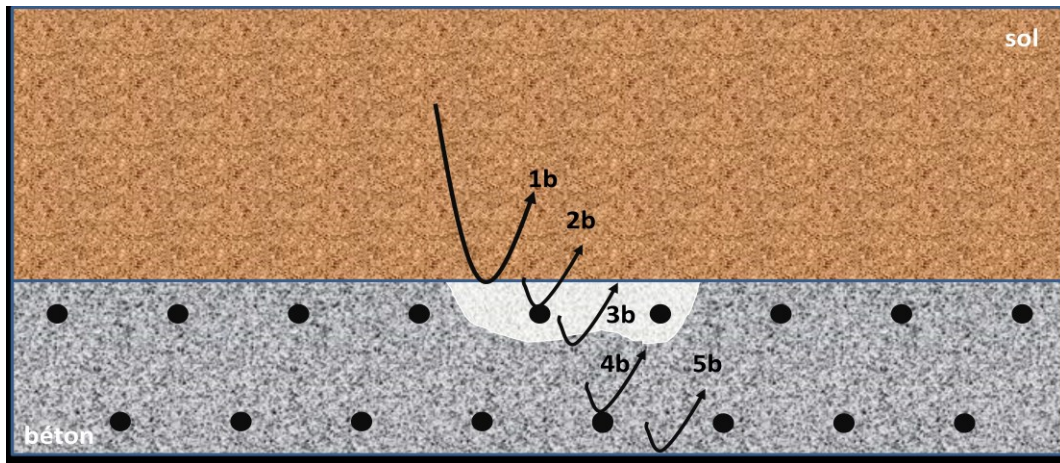


Figure 3-3 : Différentes réflexions dans le cas d'une désagrégation du béton jusqu' à la 1<sup>ère</sup> armature

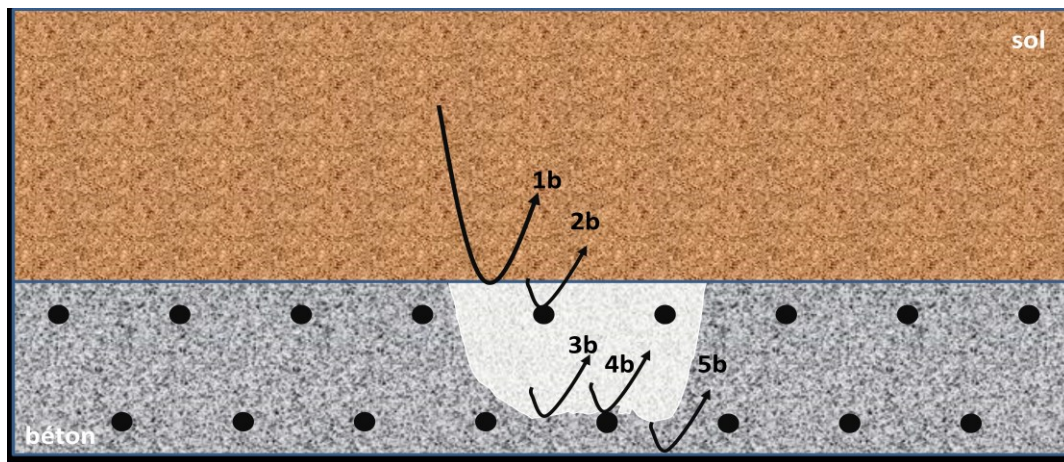


Figure 3-4 : Différentes réflexions dans le cas d'une désagrégation du béton jusqu'à la 2<sup>ème</sup> armature

### 3.3 Modèles des simulations numériques

Notre but étant de déceler les dégradations au niveau des dalles enterrées, nous aurons essentiellement trois modèles de base sur lesquels nous effectuerons nos analyses. Les modèles essayeront de représenter au mieux la structure de dalles réelles enfouies.

Ces modèles se présentent comme suit :

- **Premier modèle** : il consistera essentiellement à simuler une dalle de béton saine, armée de deux rangées d'armature et enfouie à une profondeur de 70 cm.
- **Deuxième modèle** : au niveau de la dalle du premier modèle, nous ajouterons une dégradation du béton qui atteint la première rangée d'armature.
- **Troisième modèle** : ici nous simulerons la dégradation jusqu'au niveau de la deuxième rangée d'armature.

Cependant, les simulations seront regroupées en lot afin de pouvoir répondre à chaque interrogation que nous nous posons. Ainsi nous aurons :

- 1) Le premier lot de simulations consistera à voir, avec le premier modèle, si le géoradar peut détecter une dalle enfouie sous un sol homogène. Nous définirons un type de sol, une profondeur et varierons la fréquence de l'antenne d'émission.
- 2) Le deuxième lot de simulations permettra de voir, avec le premier modèle, l'effet de la profondeur sur la capacité du géoradar à déceler une dalle enfouie. Pour un type de sol, nous fixerons 3 profondeurs et observerons l'effet sur les radargrammes.
- 3) Le troisième lot de simulations permettra d'observer, avec toujours le premier modèle, l'effet du type de sol sur la capacité du géoradar à déceler une dalle enfouie. Pour une profondeur donnée, nous simulerons 3 types de sol différents et observerons l'effet sur les radargrammes.
- 4) Le quatrième lot de simulations servira à voir, si la dégradation du béton peut être décelée. Pour un type de sol, une profondeur donnée, nous simulerons deux types de dégradation comme dans l'approche proposée (avec les deux autres modèles).

Avant de passer aux résultats des simulations, nous présenterons les trois modèles de base. Il est important de souligner que dans les modèles, nous avons utilisé des valeurs des propriétés électromagnétiques qui sont celles couramment utilisées dans la littérature. Le tableau 3-1 ci-dessous en fait la synthèse.

Tableau 3-1 : Valeurs des propriétés électromagnétiques de divers matériaux  
[Sagnard et Rejiba, 2010 ; Neyrat, 2009]

	Permittivité diélectrique relative $\epsilon$ (sans unité)	Perméabilité magnétique relative $\mu$ (sans unité)	Conductivité électrique $\sigma$ (S.m <sup>-1</sup> )
Béton sec	4	1	0,001
Béton humide	10	1	0,01
Sable	5	1	0,01
Air	1	1	0
Argile	60	1	300
Marne	15	1	100
Asphalte	4	1	0,01
Armature	$\infty$	$5 \times 10^4$	$8 \times 10^6$

### 3.3.1 Premier Modèle

Le premier modèle consiste à créer un modèle comprenant une dalle de béton sans dégradation, enfouie sous un sol de type remblai, dont les propriétés sont plus proches de celles du sable. Le remblai a une épaisseur de 60 cm et recouverte par une couche d'asphalte de 10 cm. La dalle de béton se situe donc à une profondeur de 70 cm. Elle a une épaisseur de 20 cm et contient deux rangées d'armatures. Les armatures sont espacées de 20 cm les unes des autres sur la même rangées et la deuxième rangée se situe à 10 cm de profondeur de la deuxième. Le recouvrement des armatures est de 5 cm.

La figure 3-5 présente le modèle. Le tableau 3-2 donne les propriétés électromagnétiques retenues pour chaque matériau.



Tableau 3-2 : Propriétés électromagnétiques des matériaux pour le premier modèle [ Neyrat, 2009]

	Permittivité diélectrique relative $\varepsilon$ (sans unité)	Perméabilité magnétique relative $\mu$ (sans unité)	Conductivité électrique $\sigma$ (S.m <sup>-1</sup> )
Asphalte	4	1	0,01
Remblai	5	1	0,01
Béton sain	10	1	0,01
Armature	$\infty$	$5 \times 10^4$	$8 \times 10^6$
Air	1	1	0

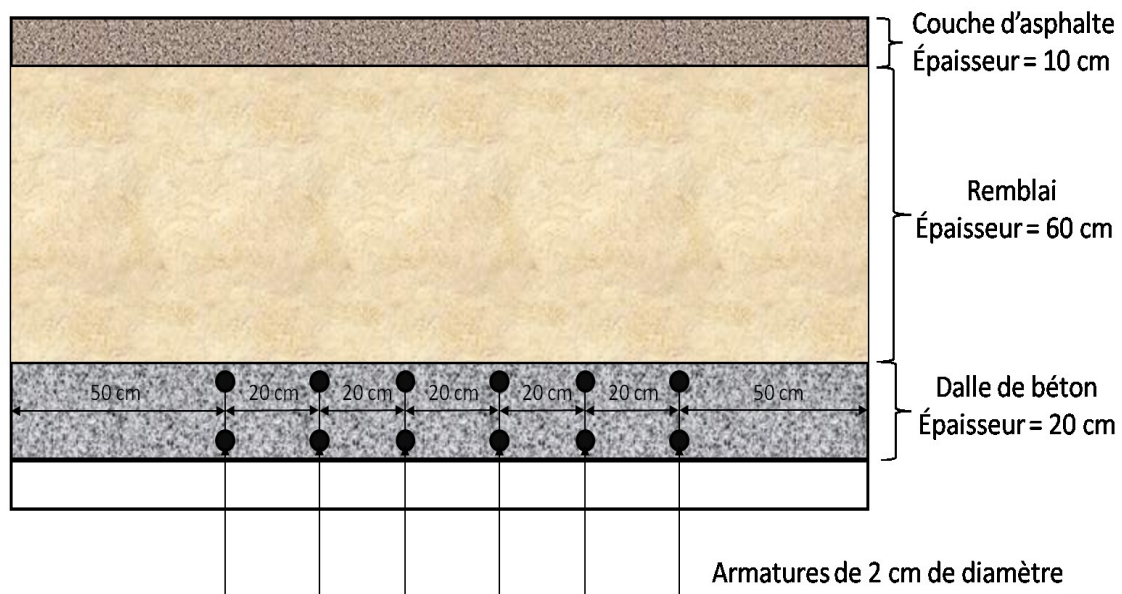


Figure 3-5 : Configuration géométrique du premier modèle

### 3.3.2 Deuxième modèle

Comme nous l'avons souligné plus haut, nous simulons ici une dégradation au niveau de dalle de béton, qui s'étend du dessus de la dalle à la première rangée d'armature. La dégradation sera représentée par un vide, qui est remplie par un matériau granulaire dont les caractéristiques sont plus proches de celles du béton sec. Comme nous le voyons sur la figure 3-6, nous



sommes partis du premier modèle, auquel nous avons ajouté une nouvelle couche de matériaux qui représente la dégradation. Le tableau 3-3 présente les propriétés électromagnétiques prises pour chaque matériau.

Tableau 3-3 : Propriétés électromagnétiques des matériaux pour le deuxième modèle [ Neyrat, 2009]

	Permittivité diélectrique relative $\varepsilon$ (sans unité)	Perméabilité magnétique relative $\mu$ (sans unité)	Conductivité électrique $\sigma$ (S.m <sup>-1</sup> )
Asphalte	4	1	0,01
Remblai	5	1	0,01
Béton désagrégé	4	1	0,001
Béton sain	10	1	0,01
Armature	$\infty$	$5 \times 10^4$	$8 \times 10^6$
Air	1	1	0

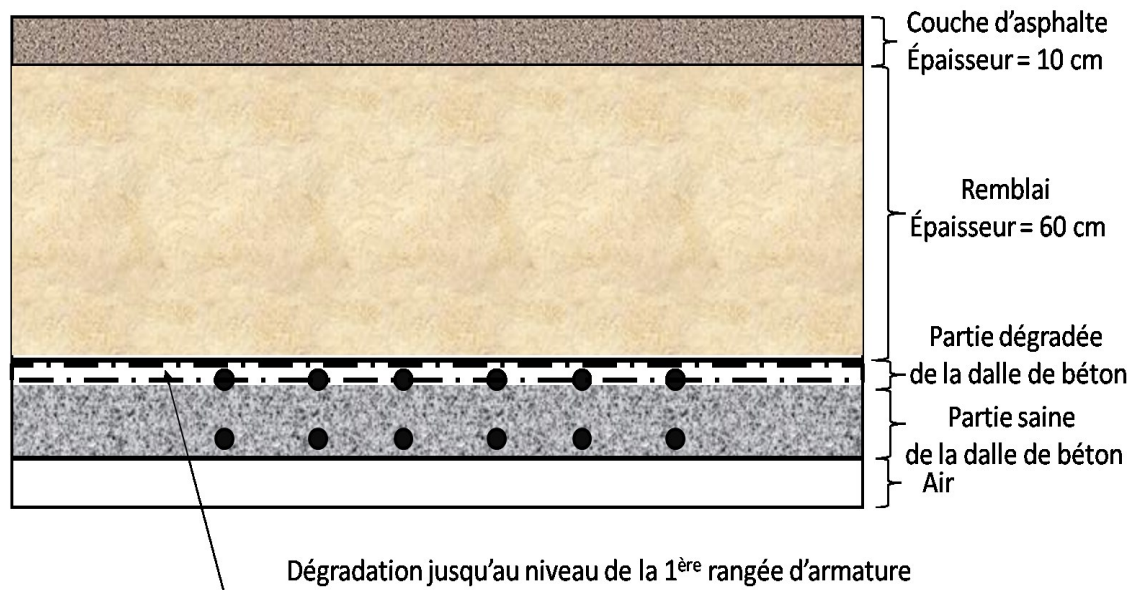


Figure 3-6 : Configuration géométrique du deuxième modèle

### 3.3.3 Troisième modèle

Ce modèle est semblable au deuxième, sauf que nous simulons une dégradation qui s'étend du dessus de la dalle à la deuxième rangée d'armature. La figure 3-7 présente la configuration géométrique du modèle. Le tableau 3-3 donne les propriétés électromagnétiques de chaque matériau, qui sont identiques à celle du deuxième modèle.

Tableau 3-4 : Propriétés électromagnétiques des matériaux pour le troisième modèle [ Neyrat, 2009]

	Permittivité diélectrique relative $\epsilon$ (sans unité)	Perméabilité magnétique relative $\mu$ (sans unité)	Conductivité électrique $\sigma$ (S.m <sup>-1</sup> )
Asphalte	4	1	0,01
Remblai	5	1	0,01
Béton désagrégé	4	1	0,001
Béton sain	10	1	0,01
Armature	$\infty$	$5 \times 10^4$	$8 \times 10^6$
Air	1	1	0

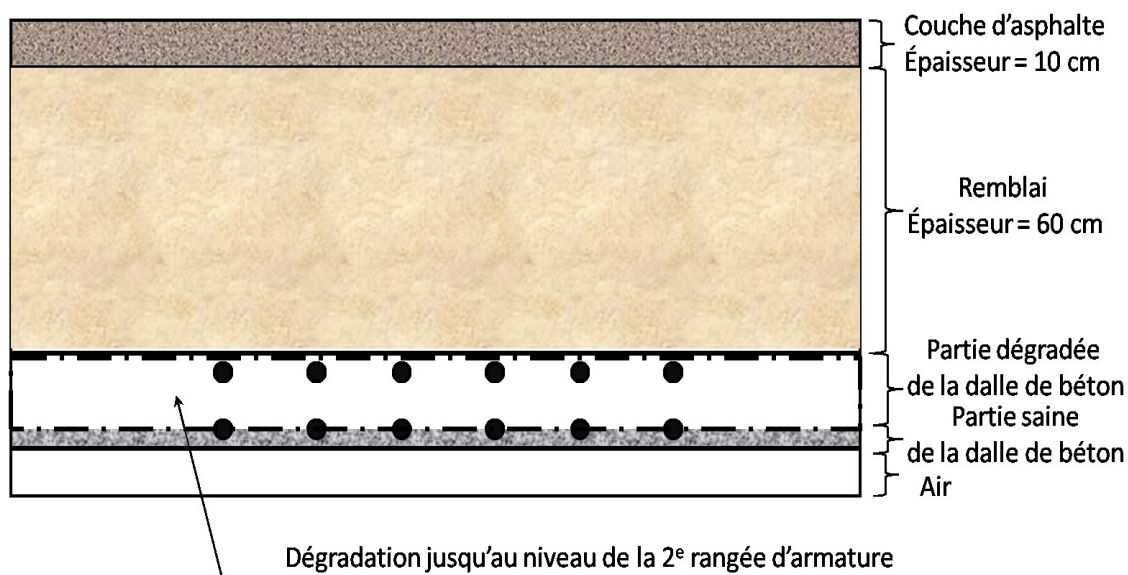


Figure 3-7 : Configuration géométrique du troisième modèle

## 3.4 Résultats des simulations numériques

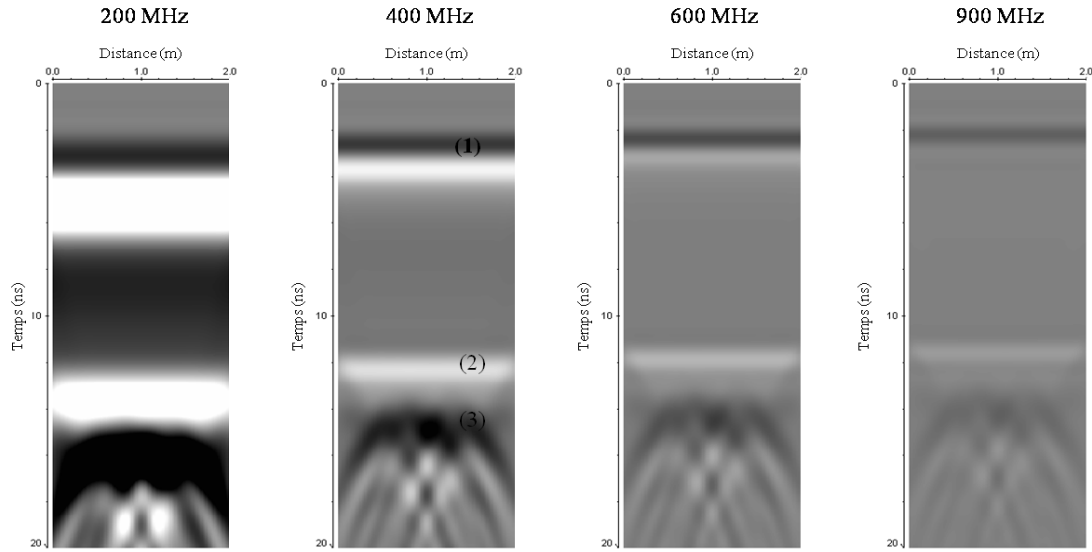
### 3.4.1 Premier lot de simulations

Comme nous l'avons mentionné plus haut, nous voulons avec le premier modèle vérifier si le géoradar peut détecter une dalle saine enfouie à une profondeur de 70 cm du sol. Nous simulerons pour la même dalle, un relevé pour chaque fréquence d'antenne : 200 MHz, 400 MHz, 600 MHz et 900 MHz. Les paramètres de simulation pour les quatre fréquences sont similaires. On a une fenêtre de temps totale de **20 ns** et un pas de scan de **1,3 cm**.

La figure 3-8 ci-dessous présente les relevés obtenus. Nous faisons les remarques suivantes :

- Avec les quatre fréquences nous arrivons à détecter la dalle enfouie.
- Les interfaces asphalte-remblai, remblai-béton et les armatures sont visibles.
- Avec les fréquences de 600 MHz et 900 MHz, les interfaces sont mieux définies, mais les intensités de réflexion sont plus faibles. Or avec les antennes de 200 MHz et de 400 MHz, c'est l'effet contraire. Ceci était prévisible car plus la fréquence est élevée, plus la résolution est élevée. Mais les intensités de réflexion sont plus faibles pour une profondeur élevée.

Il est important de souligner que ces radargrammes n'ont subi aucun traitement et ont le même niveau d'intensité de couleur. Ceci afin de pouvoir faire une comparaison plus objective.



(1) Interface asphalt-remblai (2) Interface remblai-béton (3) paraboles représentant les armatures

Figure 3-8 : Résultats des simulations avec le premier modèle aux quatre fréquences

Au vu des résultats de ce lot de simulation, nous pouvons supposer que le géoradar est capable de détecter une dalle enfouie à une profondeur de 70 cm avec un remblai de type sableux de 60 cm d'épaisseur recouvert d'une couche d'asphalte de 10 cm. Nous retenons pour la suite des simulations, l'antenne de 400 MHz, car elle permet d'avoir un bon compromis entre la résolution et l'intensité des réflexions au niveau de différentes interfaces. Nous aurons pu retenir celle de 600 MHz, mais l'intensité des réflexions y est plus faible.

### 3.4.2 Deuxième lot de simulations

Dans ce cas, nous voulions voir l'effet que peut avoir l'épaisseur du remblai sur la capacité du géoradar à détecter une dalle enfouie. Nous avons fait des simulations sur le premier modèle, avec le même type de remblai que dans le premier lot, mais pour trois épaisseurs différentes : 40 cm, 90 cm et 140 cm. Cela signifiait que la dalle était à des profondeurs respectives de 50 cm, 100 cm et 150 cm. Les résultats sont présentés sur la figure 3-9.

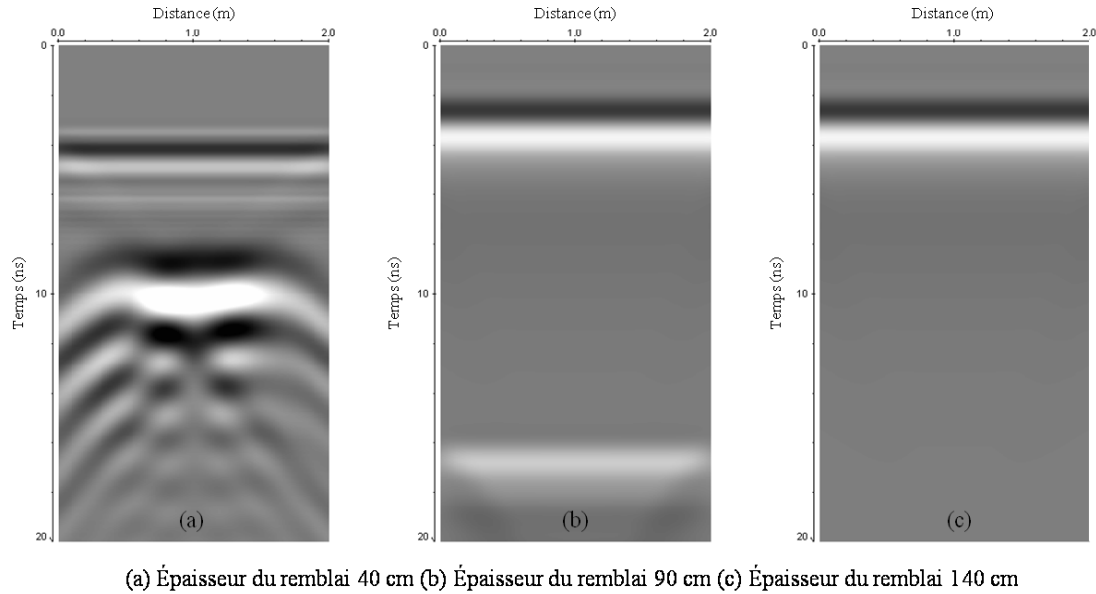


Figure 3-9 : Résultats des simulations à 400 MHz avec le premier modèle, avec différentes épaisseurs de remblai

Au vu des ces radargrammes, nous faisons les observations suivantes :

- Avec une épaisseur de remblai de 40 cm, les réflexions sur les armatures ont une intensité très forte, de manière à ce qu'il ne soit pas possible de distinguer chaque parabole des armatures.
- Avec une épaisseur de remblai de 90 cm, on n'arrive pas à voir les paraboles qui représentent les armatures. On arrive à voir juste l'interface remblai-béton.
- Avec une épaisseur de remblai de 140 cm, on ne voit plus rien.

De ces remarques, nous pouvons prévoir que les dalles enfouies à une profondeur de 100 cm et plus, sous un remblai de type sableux, seront difficiles à détecter à 400 MHz.

### 3.4.3 Troisième lot de simulations

Ces simulations ont pour objectif de prévoir l'effet que peut avoir le type de sol sur la capacité du géoradar à détecter une dalle enfouie. Avec le premier modèle, nous avons varié le type de sol de remblai. Nous avons utilisé trois types de sol : un sol sableux, marneux et argileux. La figure 3-10 en présente les résultats à 400 MHz.

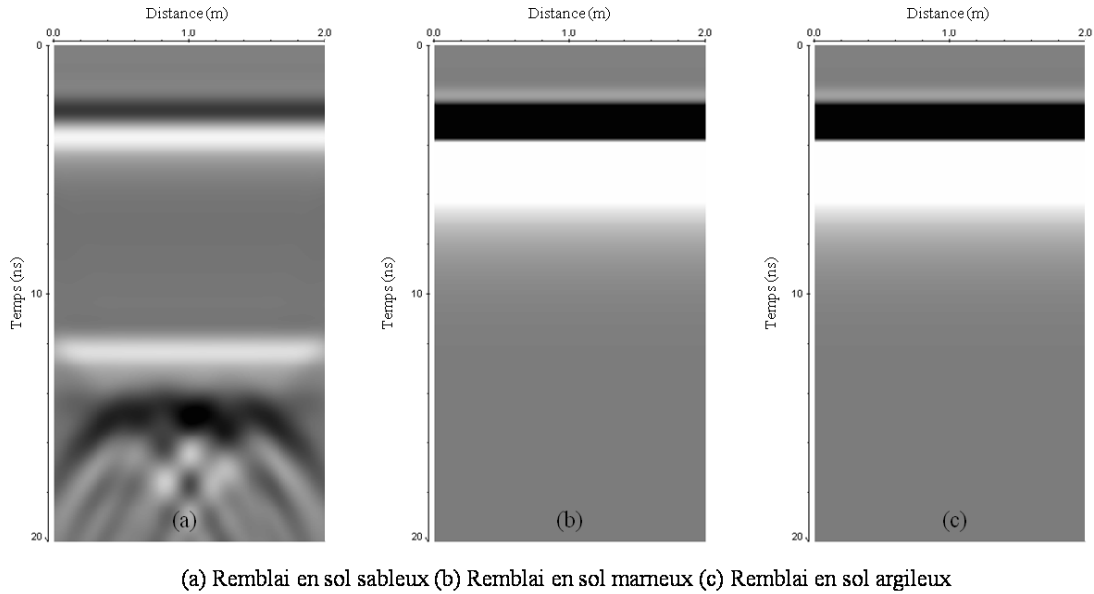


Figure 3-10 : Résultats des simulations à 400 MHz avec le premier modèle, avec la même épaisseur de remblai de 60 cm, mais différents types de sol

Sur ces radargrammes nous observons que sous les remblais en sol de type marneux et argileux, une dalle enfouie ne peut être détectée. Contrairement à une dalle enfouie dans les mêmes conditions, mais sous un remblai de type sableux.

#### 3.4.4 Quatrième lot de simulations

Nous voulons dans ce cas voir si sur les radargrammes nous pouvons déceler une dégradation au niveau des dalles enfouies. Nous voulons savoir comment cette dégradation peut être identifiée. Pour ce faire, nous avons effectué des simulations avec les trois modèles. À savoir :

- La dalle D1 qui représente une dalle sans dégradation (premier modèle).
- La dalle D2 qui représente une dalle avec une dégradation dans le béton, qui s'étend de l'interface remblai-béton jusqu'à la première rangée d'armature (deuxième modèle).
- Et la dalle D3 qui représente une dalle avec une dégradation dans le béton, qui s'étend de l'interface remblai-béton jusqu'à la deuxième rangée d'armature (troisième modèle).

La figure 3-11 présente les radargrammes obtenus.

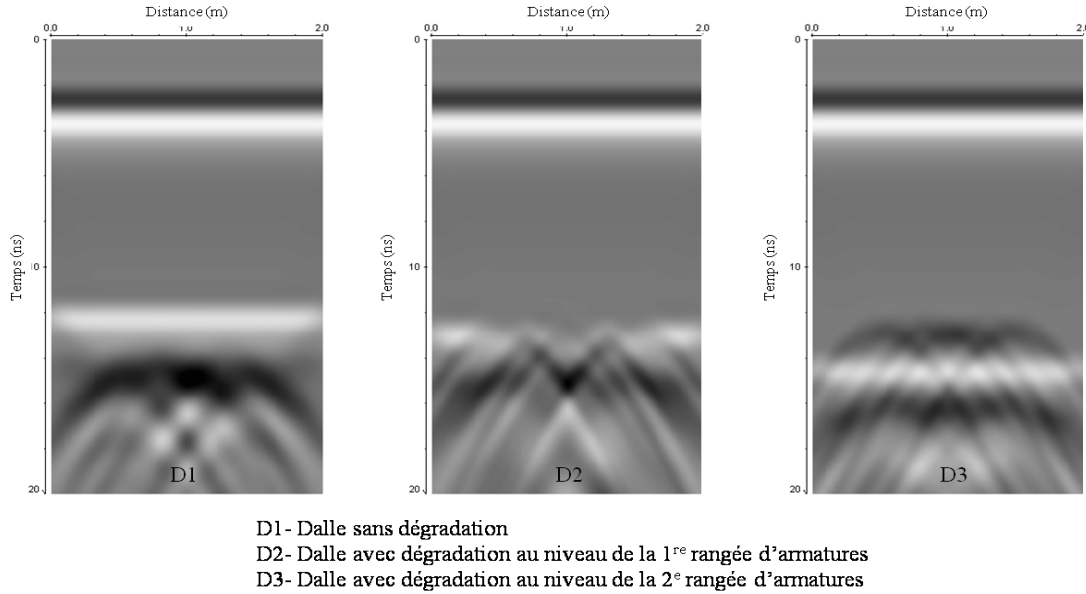


Figure 3-11 : Résultats des simulations à 400 MHz de la dégradation dans le béton, d'une dalle enfouie sous un remblai de type sableux de 60 cm d'épaisseur

Sur ces radargrammes, nous faisons les observations suivantes :

- La dégradation au niveau de la Dalle D2 s'identifie par la disparition de l'interface remblai-béton et l'arrivée en avance des réflexions sur les armatures comparativement à la dalle D1.
- La dégradation au niveau de la dalle D3 s'identifie essentiellement par l'arrivée en avance des réflexions sur les armatures comparativement à la dalle D1, comme avec la dalle D2.

Au vu de ces observations, nous prévoyons que les dégradations au niveau d'une dalle enfouie peuvent être détectées. Les indices de dégradation peuvent être la non-visibilité de l'interface remblai-béton et l'arrivée en avance des réflexions sur les armatures.

### **3.4.5 Conclusion des simulations**

Ces différentes simulations nous ont permis de nous faire une idée des limites du géoradar, quant à la résolution de notre problématique. Ces limites se résument essentiellement au type de sol du remblai et à la profondeur d'enfouissement de la dalle. Nous pouvons supposer, que les dégradations au niveau d'une dalle enfouie à une profondeur de moins de 100 cm, sous un remblai de type sableux, peuvent être détectées par le géoradar. Ce qui est le cas des chambres de l'IREQ. Nous allons donc effectuer des relevés sur ces dalles afin de valider ou non, nos suppositions et répondre à notre problématique.



# CHAPITRE 4 RELEVÉS EXPÉRIMENTAUX

## 4.1 Processus expérimental

### 4.1.1 Site expérimental

À l'IREQ, six chambres souterraines ont été construites sur un site extérieur, sous un sol recouvert d'asphalte, pour servir à des fins expérimentales. Ces chambres n'ont pas été construites uniquement dans le cadre de nos travaux, plusieurs autres essais se font aussi sur ce site.

Les six chambres sont disposées, comme le présente la figure 4-1.

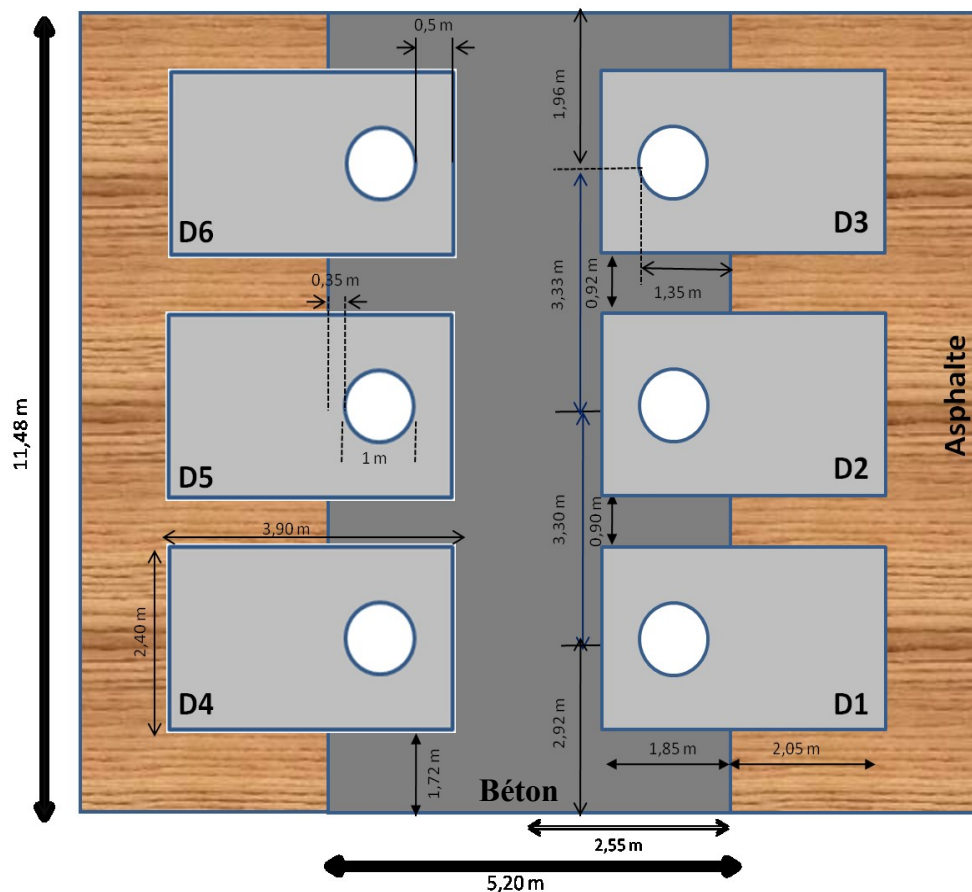


Figure 4-1 : Disposition des chambres d'essais de l'IREQ

Chaque chambre souterraine est construite avec des parois en béton armé et enfouie de sorte que la surface du toit soit recouverte de 75 cm pour les chambres D1 à D3, et de 1 m pour les chambres D4 à D6. Notons que ces valeurs sont approximatives, car l'IREQ ne veut pas encore donner la géométrie exacte des dalles, puisque les expérimentations continuent. La géométrie de chacune des chambres est illustrée par la coupe de profil sur figure 4-2.



Figure 4-2 : Géométrie d'une chambre souterraine

Il est important de souligner, que l'état de dégradation des dalles et la disposition des armatures des dalles, ne nous ont pas été communiqués.

#### 4.1.2 Equipement utilisé

Nous avons utilisé un géoradar de la compagnie IDS. La figure 4-3 présente les différentes composantes de ce Géoradar. L'appareil est constitué d'une boîte contenant les deux ensembles d'antennes (Émetteurs et receveurs) de différentes fréquences (1). Ces antennes sont reliées à l'unité de contrôle comportant un module d'acquisition (4). Le chariot (3) est équipé d'un dispositif de mesure de distance parcourue et possède un ensemble de 2 batteries (2) et d'un socle pour l'ordinateur permettant l'enregistrement et la visualisation des résultats en temps réel (5).



Figure 4-3 : Composantes du système d'acquisition des données

La boîte d'antenne contient deux antennes comme le présente la figure 4-4. Les deux antennes peuvent chacune fonctionner à deux différentes fréquences. Nous avons une boîte d'antenne qui peut rayonner à 900 et 400 MHz et une autre à 600 et 200 MHz.

À l'intérieur d'une boîte antenne, les deux paires de dipôles sont toutes parallèles de sorte que celle associée à la plus haute fréquence est la plus rapprochée (figure 4-4).

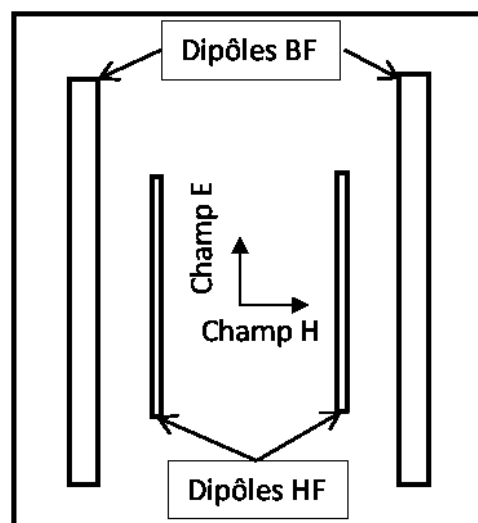


Figure 4-4 : Configuration de l'antenne utilisée comportant des dipôles haute fréquence (HF) et basse fréquence (BF).

Les paramètres de réglages du radar qui ont été utilisés pour les essais sont présentés par les figure 4-5 et figure 4-6 suivantes :

**Radar settings**

N. of channel: 2      P.R.F.: 200 kHz      Wheel Model: 2Dir      Step: 0.013 m

N. Tx: 2      Phase Tx: 0 Deg      Integration: 3      Resolution: 0.00444 m

N. Rx: 2      Phase Rx: 10 Deg

A/D sampl. freq.: 200000.000 Hz      S.o.S. Hi: 100 us      Remote: 5 Buttons      Remote: ☐

Tx sequence: 1 2      Multiplexer Model: Hi-Mod      Connector: 1

Rx sequence: 1 2

**Array Tx**

Freq.(MHz): 900 400      ☐ Interleaving

X0 (m): 0 0      Ch N Range (ns) Samples Min factor

Y0 (m): -0.33 -0.17      1 40 1024 288 1

Alpha (°): 0 0      2 40 1024 128 1

**Array Rx**

Freq.(MHz): 900 400

X0 (m): 0 0

Y0 (m): -0.24 -0.40

Alpha (°): 0 0

Figure 4-5 : Paramètres de réglage pour l'antenne 900/400 MHz

Figure 4-6 : Paramètres de réglage pour l'antenne 600/200 MHz

En résumé, les paramètres de mesures pour les quatre fréquences sont similaires. On a une fenêtre de temps totale de **40 ns**, un pas de scan de **1,3 cm** et un nombre d'échantillons égal à **1024**. Ce qui permettra d'avoir plus de précision dans nos relevés.

### 4.1.3 Relevés effectués

Les essais ont été effectués en deux séries. La première série s'est effectuée avec une configuration traditionnelle des antennes, polarisation 1 (souvent nommée VV), pour mieux faire ressortir les réflexions sur les armatures (figure 4-7). Et la deuxième série s'est fait avec une configuration des antennes en polarisation 2 (souvent nommée HH). Ces polarisations se présentent comme suit :

- la polarisation 1 : les antennes émettrice et réceptrice sont perpendiculaires au sens de déplacement (a).
- la polarisation 2 : les antennes émettrice et réceptrice sont parallèles au sens de déplacement (b).

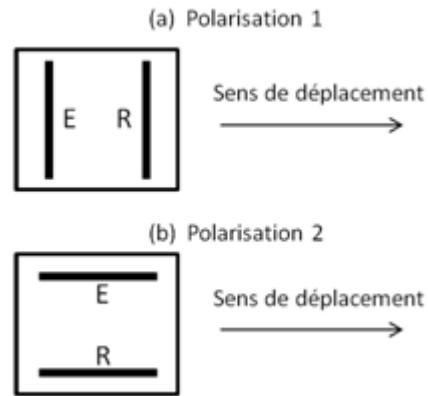


Figure 4-7 : Polarisation des antennes

Chaque série d'essais a été réalisée suivant un quadrillage identique avec l'antenne de 900/400 MHz et ensuite l'antenne de 600/200 MHz. Le quadrillage a été tracé sur chaque dalle, afin de réaliser des relevés radar longitudinaux et transversaux sur chaque dalle individuellement. Ce balayage suivant deux directions permet de vérifier la cohérence des résultats.

Les relevés longitudinaux et transversaux pour chaque dalle ont été effectués comme suit :

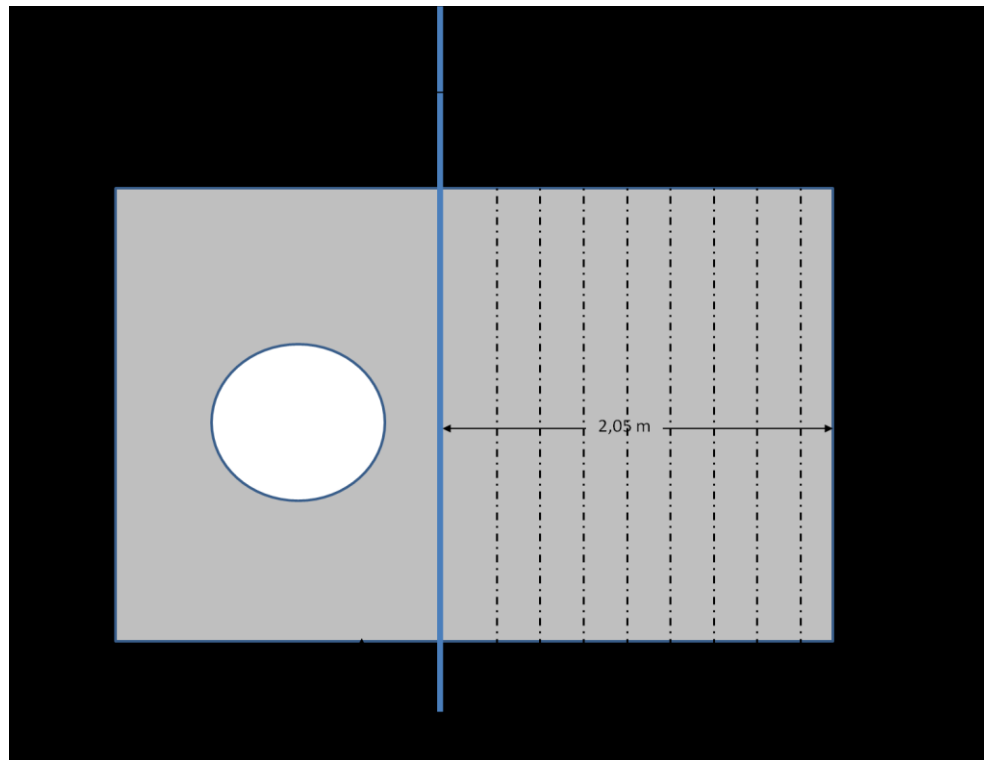


Figure 4-8 : Relevés longitudinaux sur une dalle

Comme nous le voyons sur la figure 4-8, les relevés longitudinaux consistaient en 9 lignes espacées de 25 cm en commençant de la gauche vers la droite, la première ligne se trouvant à 35 cm du bord du trottoir. Afin de mieux quadriller la dalle, chaque ligne commençait à 50 cm de l'extrémité inférieure de la dalle pour finir plus loin à 60 cm de l'extrémité supérieure de celle-ci.

De même la figure 4-9 présente la manière dont les relevés transversaux ont été effectués. Ils consistent en 15 lignes espacées de 25 cm les uns des autres. La première ligne était à 50 cm de la bordure inférieure de la dalle pour les dalles D1, D2 et D3 et à 60 cm pour les dalles D4, D5 et D6. Toutes les lignes commençaient à 35 cm de la bordure du trottoir pour finir à 30 cm au-delà de la limite droite de la dalle.

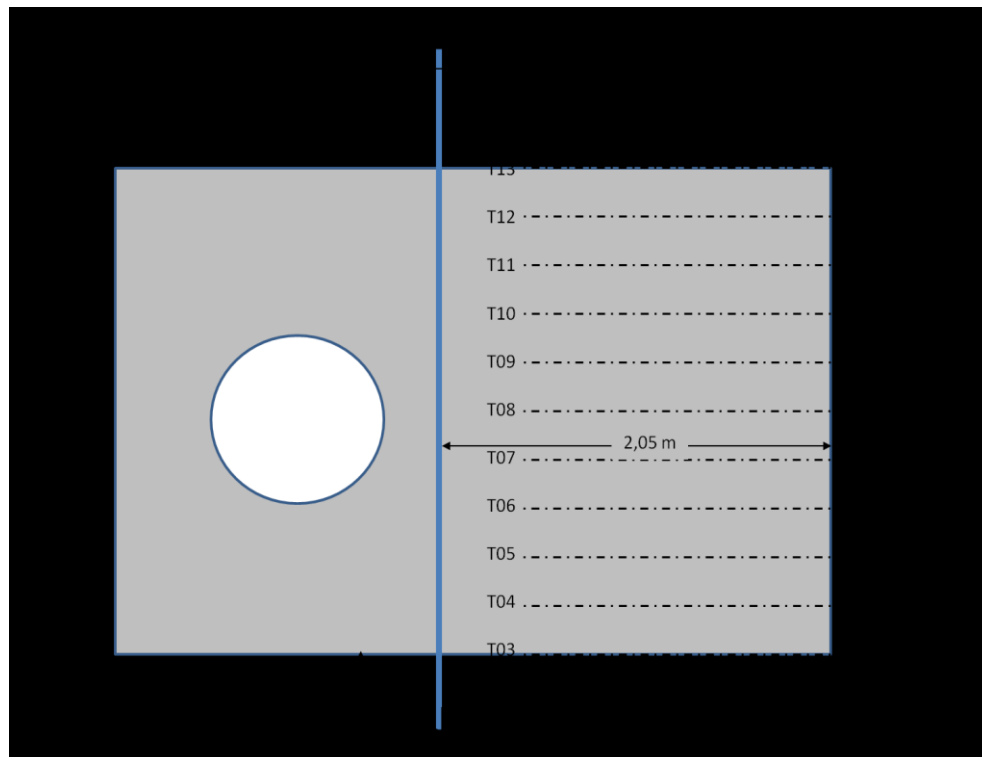


Figure 4-9 : Relevés transversaux sur une dalle

## 4.2 Présentation des résultats

### 4.2.1 Radargrammes bruts

Sur la figure 4-10 nous voyons les radargrammes bruts des relevés effectués sur la ligne longitudinale (L05) de la dalle D1 aux quatre fréquences avec la polarisation 1. On ne peut y distinguer clairement que l'onde directe et la réflexion sur l'asphalte. Alors, pour mieux voir les réflexions provenant des dalles souterraines, il faudra apporter aux radargrammes des traitements. Ce qui sera fait dans la section suivante.

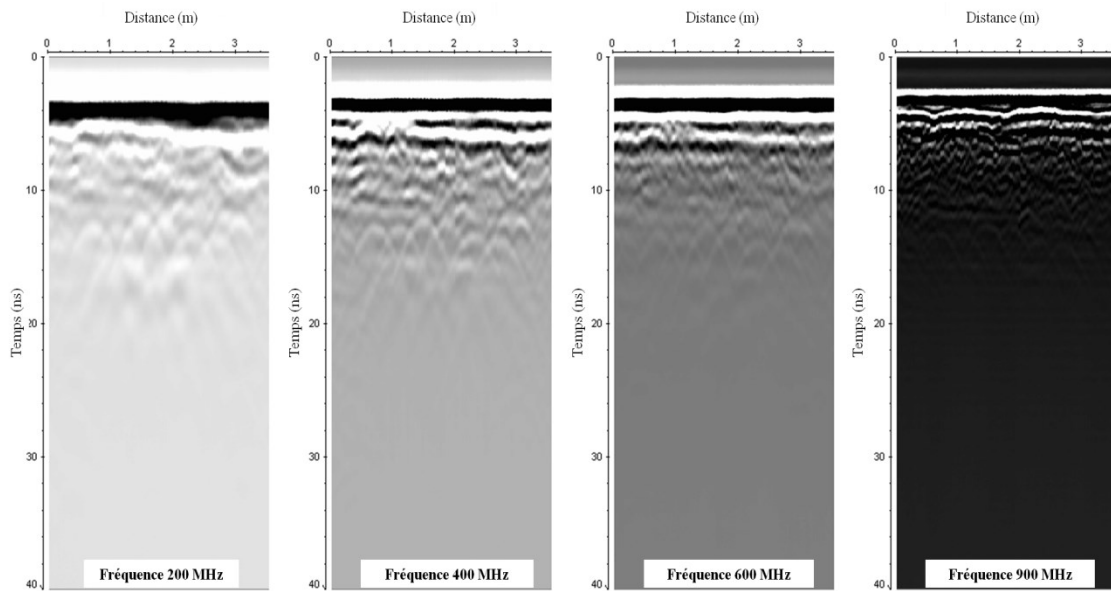


Figure 4-10 : Radargrammes bruts des relevés effectués sur la ligne longitudinale (L05) de la dalle D1 aux quatre fréquences

### 4.2.2 Traitements des radargrammes

Le traitement des données a été effectué grâce au logiciel REFLEXW version 7.0.1, produit de la compagnie Sandermeier. C'est avec le même logiciel que les simulations ont été effectuées. Ceci afin d'avoir la même base de comparaison.

Le traitement appliqué aux radargrammes se résume aux étapes suivantes :

- Déplacement des signaux au temps initial d'émission : en effet il existe un décalage entre le temps initial (zéro) et le délai du premier pic positif de l'onde directe, qu'il faut corriger.



- Filtrage des signaux : un filtrage de type Butterworth est appliqué entre des fréquences limites, sélectionnées grâce au spectre fréquentiel du domaine fréquentiel de l'onde, de manière à ce que l'impulsion radar ne soit pas modifiée par distorsion (tableau 4-1).
- Application d'un gain variable : pour faire ressortir les échos profonds provenant de la dalle, en minimisant ceux du remblai se trouvant au-dessus, qui sont plus intenses. La manière dont le gain est appliqué, est présentée dans tableau 4-1.
- Suppression du background : afin d'éliminer les échos de surface qui peuvent perturber les réflexions sur les autres interfaces.

Tableau 4-1 : Paramètres de traitement pour chaque fréquence

Fréquences (MHz)	Fréquences de filtrage (MHz)	Gain
900	300÷1500	(7ns, 0 dB) - (10ns, 30 dB) - (20ns, 30 dB)
600	100÷1000	(7ns, 0 dB) - (10ns, 30 dB) - (20ns, 30 dB)
400	60÷1000	(7ns, 0 dB) - (9ns, 30 dB) - (20ns, 30 dB)
200	50÷650	(7ns, 0 dB) - (8ns, 30 dB) - (20ns, 30 dB)

Les figure 4-11 et figure 4-12 présentent les résultats obtenus après traitement pour le relevé de la ligne longitudinale (L05) de la dalle D1 pour les quatre fréquences suivant les deux polarisations.

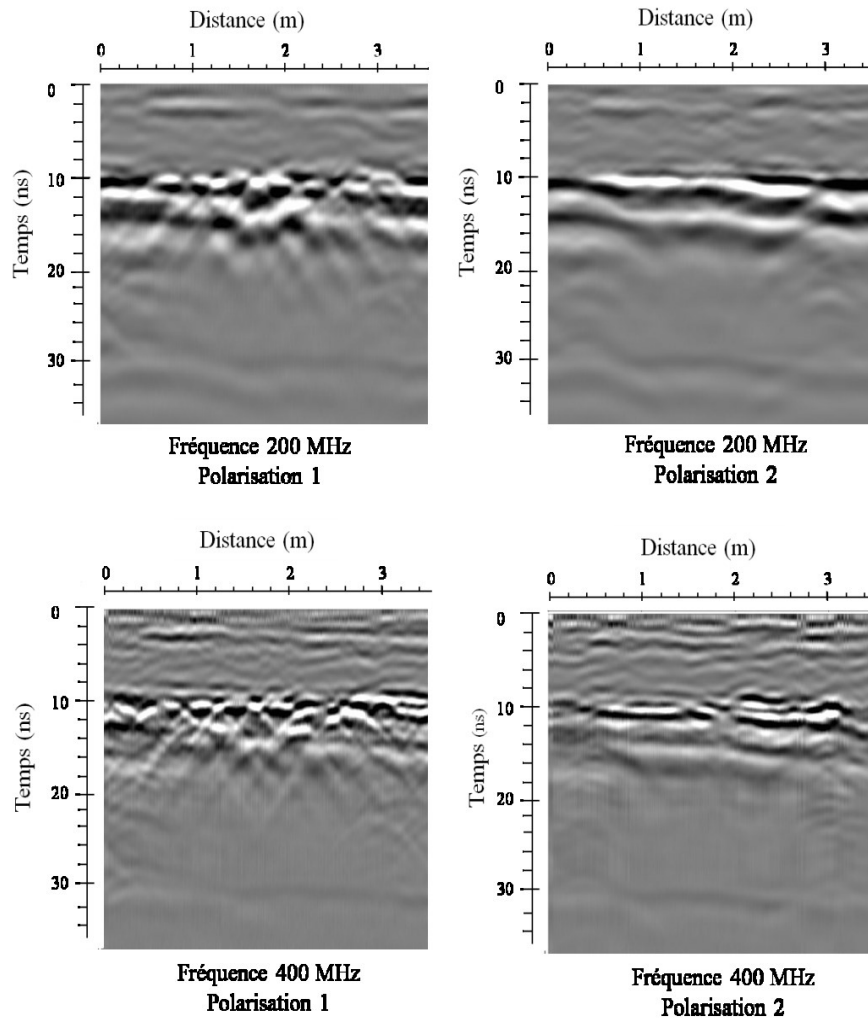


Figure 4-11 : Radargrammes obtenus après traitement de la ligne longitudinale (L05) de la dalle D1 avec les deux polarisations pour les fréquences de 200 MHz et 400 MHz

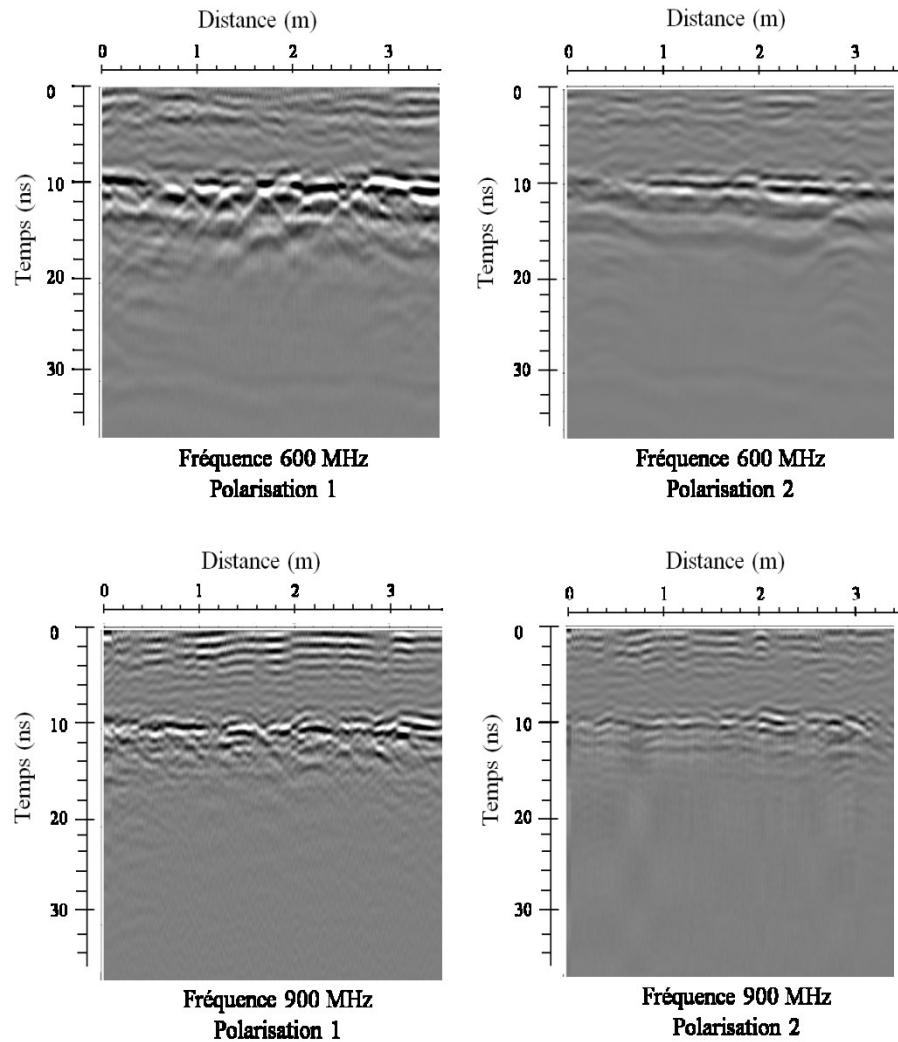


Figure 4-12 : Radargrammes obtenus après traitement de la ligne longitudinale (L05) de la dalle D1 avec les deux polarisations pour les fréquences de 600 MHz et 900 MHz

Nous voyons que grâce au traitement, nous arrivons à voir différentes interfaces de réflexion comme les armatures de la dalle (paraboles) ou l'interface remblai-béton. Nous remarquons que la visibilité n'est pas pareille pour toutes les fréquences. Il convient donc de choisir une fréquence qui nous permet d'avoir une bonne résolution pour la détection de ces interfaces.

En regardant les radargrammes, notre choix se portera entre l'antenne de 400 MHz et celle de 600 MHz, car avec la 200 MHz il y a moins de résolution et avec la 900 MHz les amplitudes de réflexion sont plus faibles. En effet avec la 200 MHz, les hyperboles qui représentent les armatures ne peuvent pas être distinguées. Par ailleurs, l'utilisation d'une fréquence de 900 MHz ne permet pas de bien voir les hyperboles même si l'image est nette.

Avec la 600 MHz, on voit bien les hyperboles comme avec la 400 MHz pour la polarisation 1. Cependant, pour la polarisation 2, les interfaces visibles avec la 400 MHz, sont moins visibles avec la 600 MHz surtout ceux plus profond (à 30 ns).

**Nous choisissons donc pour la suite de notre étude, d'utiliser les données obtenues avec l'antenne de 400 MHz.**

### 4.2.3 Radargrammes traités des six dalles

Les figure 4-13 et figure 4-14 présentent les résultats obtenus après traitement du relevé de la ligne longitudinale (L05) de toutes les dalles (D1 à D6) pour la fréquence de 400 MHz, suivant les deux polarisations.

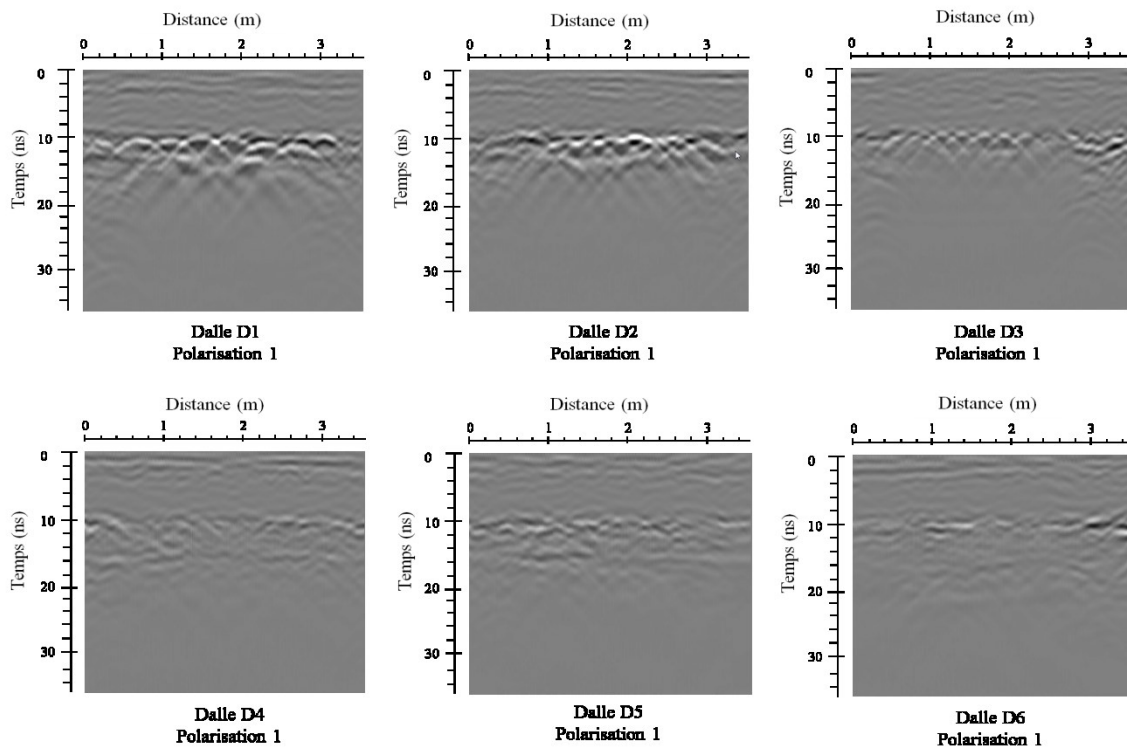


Figure 4-13: Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L05) pour toutes les dalles à la fréquence de 400 MHz avec la polarisation 1

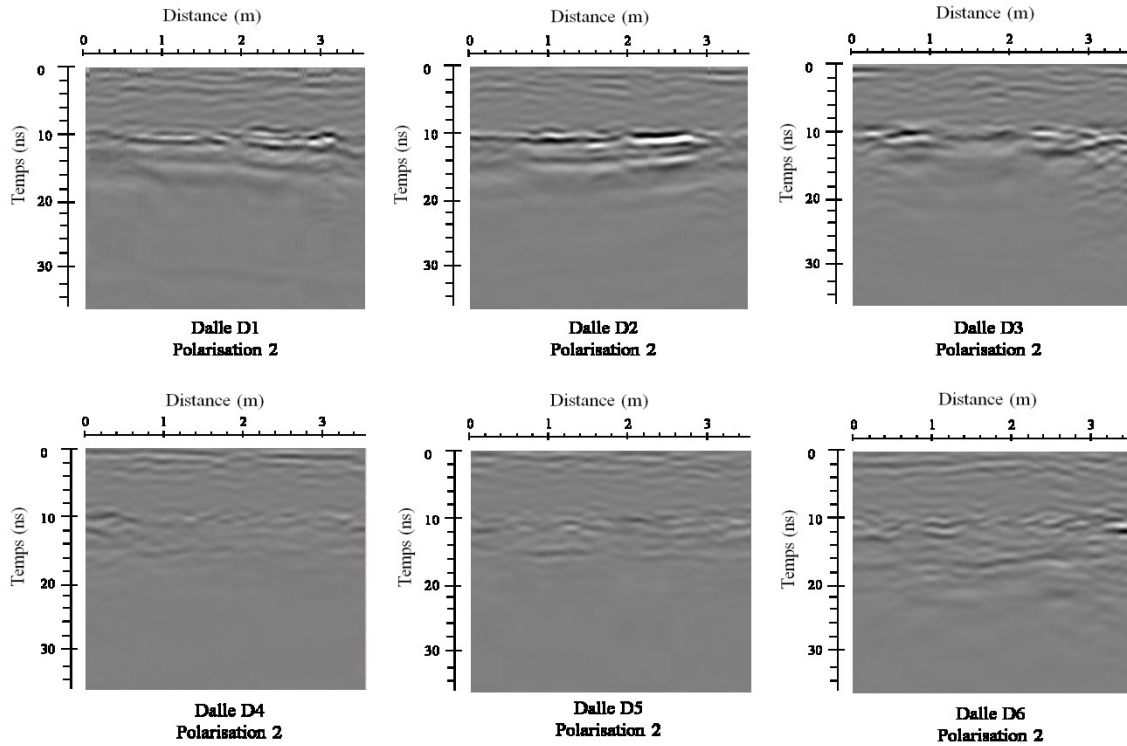


Figure 4-14 : Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L05) pour toutes les dalles à la fréquence de 400 MH, avec la polarisation 2

Nous remarquons que les réflexions sur les différentes interfaces, que nous arrivons à parfaitement distinguer au niveau des dalles D1, D2 et D3 ; ne sont pas visibles au niveau des dalles D4, D5 et D6. Et cela peut importe le type de polarisation. En effet pour la polarisation 1, nous voyons que les hyperboles sont difficilement distinguables sur les radargrammes des dalles D4, D5 et D6 contrairement aux dalles D1, D2 et D3. De même pour la polarisation 2, nous n'arrivons pas à distinguer les interfaces visibles au niveau des radargrammes des dalles D1, D2 et D3, sur les radargrammes des dalles D4, D5 et D6. Cela s'explique par le fait que les dalles D4, D5 et D6 sont enfouies à une profondeur plus importante que les autres. Les réflexions sur les interfaces sont effectivement plus atténuées pour un signal de même fréquence, comme nous l'avons démontré par la simulation numérique.

Pour la suite de nos travaux, nous avons donc décidé de nous focaliser uniquement sur les dalles D1, D2 et D3.

#### 4.2.4 Résultats obtenus avec les dalles D1, D2 et D3

Ayant des relevés avec les deux polarisations, nous avons décidé de voir dans un premier temps, quelles informations nous pourrions tirer en mixant pour une même ligne les données des deux polarisations, avant d'étudier les données pour chaque polarisation séparément. Nous nommerons dans la suite, ces profils de mixtes.

##### 4.2.4.1 Résultat des profils mixtes

La Figure 4-15 présente le profil mixte, obtenu par addition pour la même ligne longitudinale (L05) de la dalle D1, des amplitudes obtenues pour les deux polarisations avec l'antenne de 400 MHz. Il est opportun de notifier que nous avons appliqué au profil obtenu avec la polarisation 1, un traitement appelé migration, afin de réduire les hyperboles représentant les armatures en points. Ceci dans le but de rendre les images de nos relevés plus nettes, pour faciliter la comparaison. Nous avons utilisé la migration de Kirchhoff (présenté dans le paragraphe suivant) avec une largeur de 50 traces et une vitesse de 0,09 m/ns. Ces paramètres sont ceux qui nous donnent la meilleure résolution.

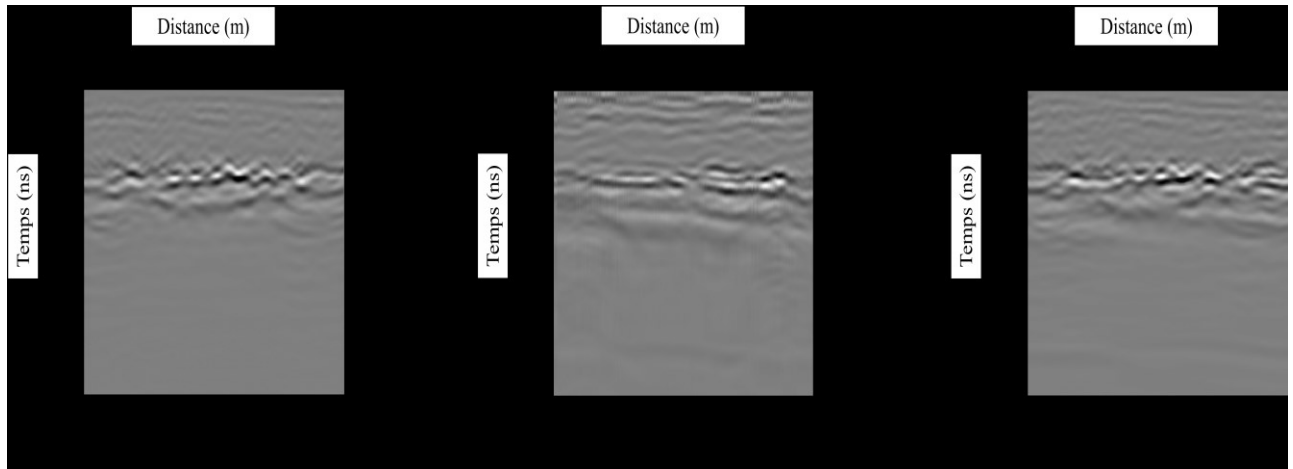


Figure 4-15 : Processus pour l'obtention de profil mixte

Notre constat est qu'avec le profil mixte, nous arrivons toujours à distinguer les armatures. Mais les interfaces de réflexion qui sont bien visibles avec la polarisation 2 (situés à 10ns et 12 ns), le sont beaucoup moins sur le profil mixte. Nous avons donc décidé d'étudier les profils séparément, afin d'optimiser les informations que chaque polarisation nous offrait.

#### 4.2.4.2 Résultat des profils obtenus avec la polarisation 1

Dans le souci d'alléger la présentation des résultats, nous ne présenterons ici que les radargrammes obtenus pour la ligne longitudinale L05. Les radargrammes des lignes L03 et L07 sont présentés en annexes. De plus, les observations faites seront exposées et discutées dans le paragraphe consacré à l'analyse des résultats. Nous avons choisi les radargrammes de ces trois lignes car elles représentent mieux l'état des dalles.

Comme nous l'avons souligné dans le paragraphe précédent, nous avons appliqué au profil avec hyperboles la migration de Kirchhoff avec une largeur de 50 traces et une vitesse de 0,09 m/ns. La figure 4-16 présente le processus.

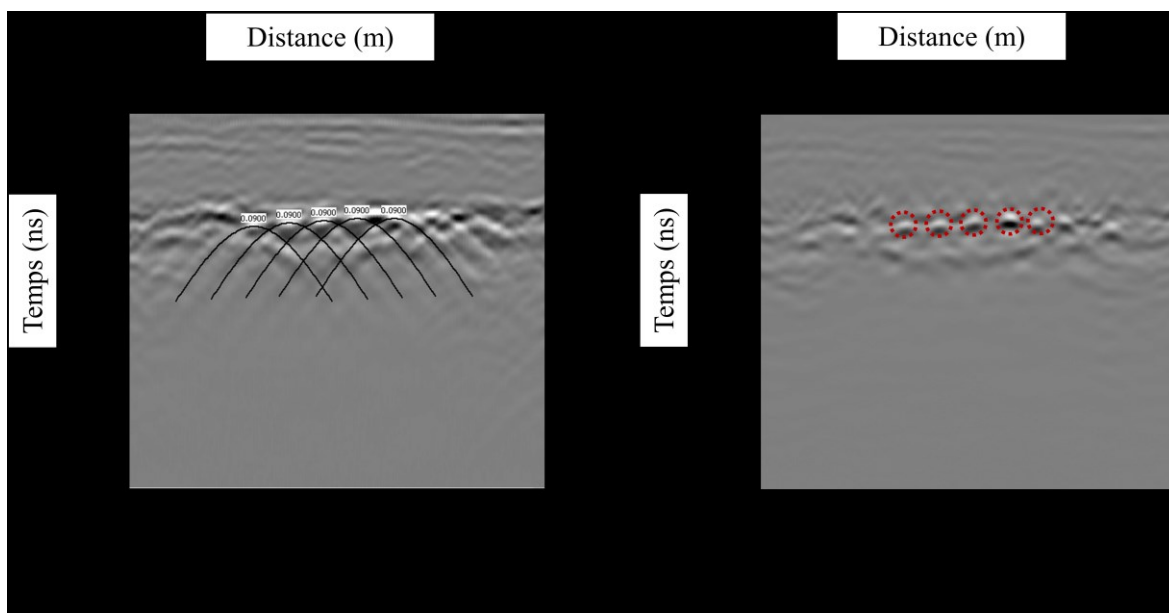


Figure 4-16: Processus de migration

Sur la figure 4-17 ci-dessous, nous présentons les radargrammes de la ligne longitudinale L05 pris à la fréquence de 400 MHz avec la polarisation 1, pour les trois dalles ; mis côte à côte afin de faciliter les comparaisons visuelles.

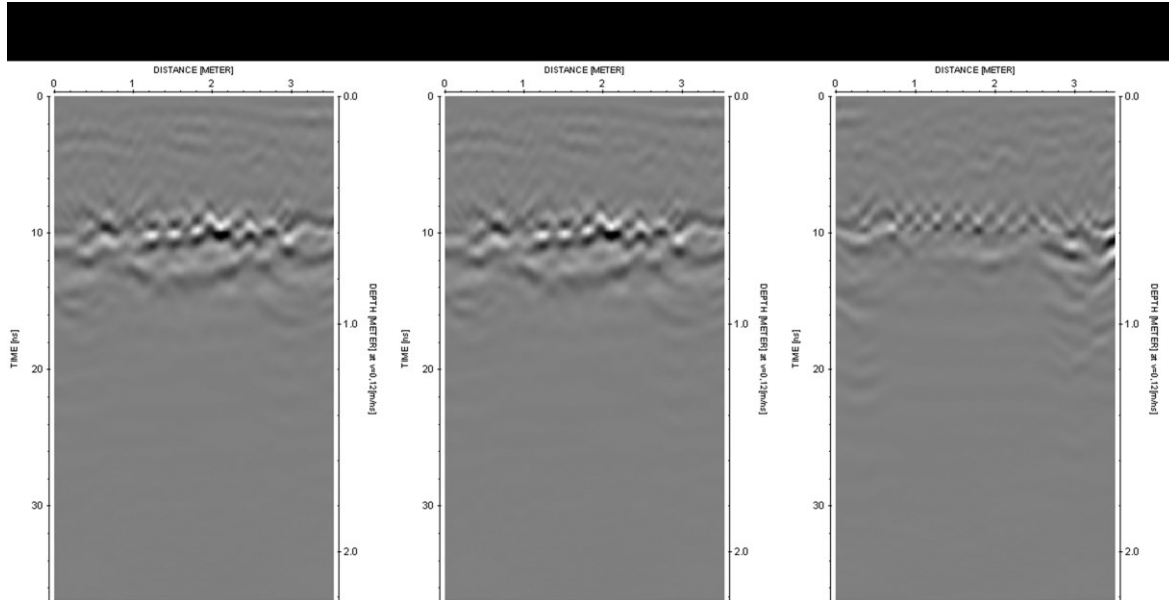


Figure 4-17: Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L05) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz avec la polarisation 1 (avec migration)

#### 4.2.4.3 Résultat des profils obtenus avec la polarisation 2

De même que pour la polarisation 1, nous ne présenterons ici que les radargrammes obtenus pour la ligne longitudinale L05. Les radargrammes des lignes L03 et L07 sont présentées en annexes, et les observations faites seront exposées et discutées dans le paragraphe consacré à l'analyse des résultats.

La figure 4-18 ci-dessous, nous présente les radargrammes de la ligne longitudinale L05, à la fréquence de 400 MHz, avec la polarisation 2, pour les trois dalles.



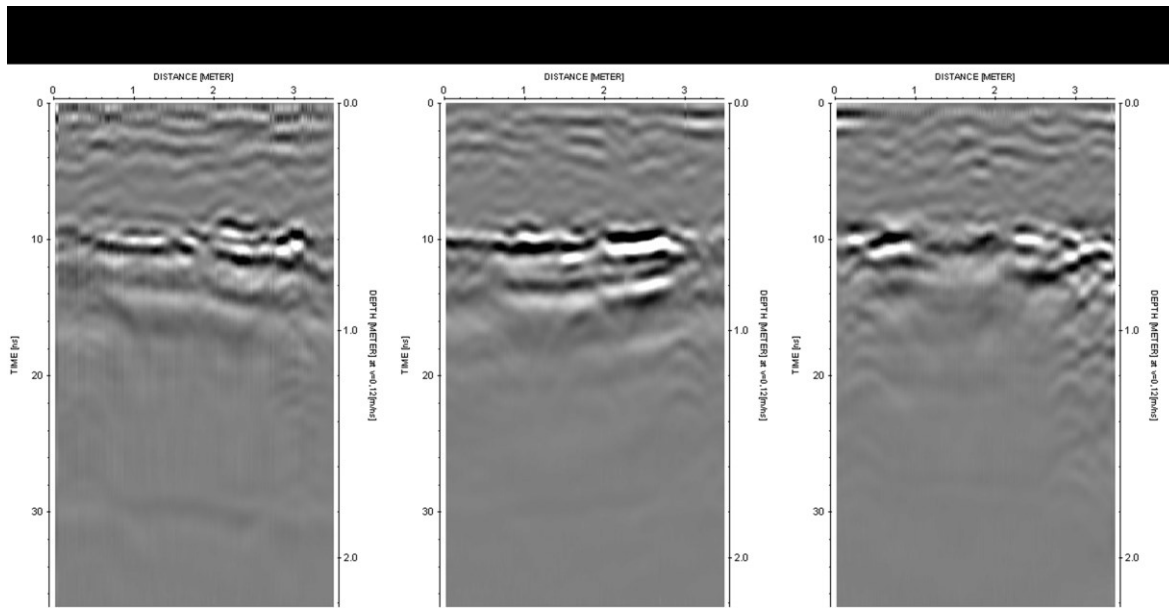


Figure 4-18 : Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L05) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 2

### 4.3 Analyse et interprétation des résultats

Dans cette partie, nous présenterons l'analyse des résultats des données recueillies et traitées pour les dalles D1, D2 et D3. Dans un premier temps, nous présenterons les constations faites lors de l'analyse visuelle des radargrammes. Ensuite, nous présenterons les résultats qui découlent des études faites sur les amplitudes de réflexion et sur les temps de réflexion. Et pour finir, nous ferons une interprétation de ces analyses, qui constituera la synthèse des travaux effectués à ce niveau.

#### 4.3.1 Analyse visuelle

L'importance et la viabilité de l'analyse visuelle n'étant plus à démontrer [Tarussov A., Vandry M. et Blais J., 2010]. Nous présentons ici les résultats découlant de cette analyse. Les figure 4-19 et figure 4-20 présentent les radargrammes de la ligne longitudinale L05 pour les trois dalles. Ces figures nous permettent de faire les constats suivants :

➤ Avec la polarisation 1 (les antennes émettrice et réceptrice perpendiculaires au sens de déplacement) :

- L'interface sur laquelle nous pouvons nous baser, pour détecter la dégradation dans la dalle de béton, est l'interface béton-armature supérieure (réflexion sur les armatures supérieures). En effet, les autres interfaces sont mal visibles ou carrément invisibles.
- La dégradation se constate par une mauvaise visibilité des armatures et une arrivée en avance de la réflexion sur les armatures, se trouvant dans une zone désagrégée. En supposant bien sûr qu'il n'y ait pas de différence au niveau de l'épaisseur de remblai des dalles.

Cela se voit aisément entre les dalles D1 et D3, ou D2 et D3, ce qui n'est pas le cas entre les dalles D1 et D2. Comme nous le voyons sur la figure 4-19, les points qui représentent les armatures, sont d'une clarté plus vive sur les radargrammes des dalles D1 et D2, que sur celui de la dalle D3. Et ces points se situent plus hauts (avant 10 ns) sur le radargramme de la dalle D3, contrairement à ceux des dalles D1 et D2 qui sont plus bas (après 10 ns).

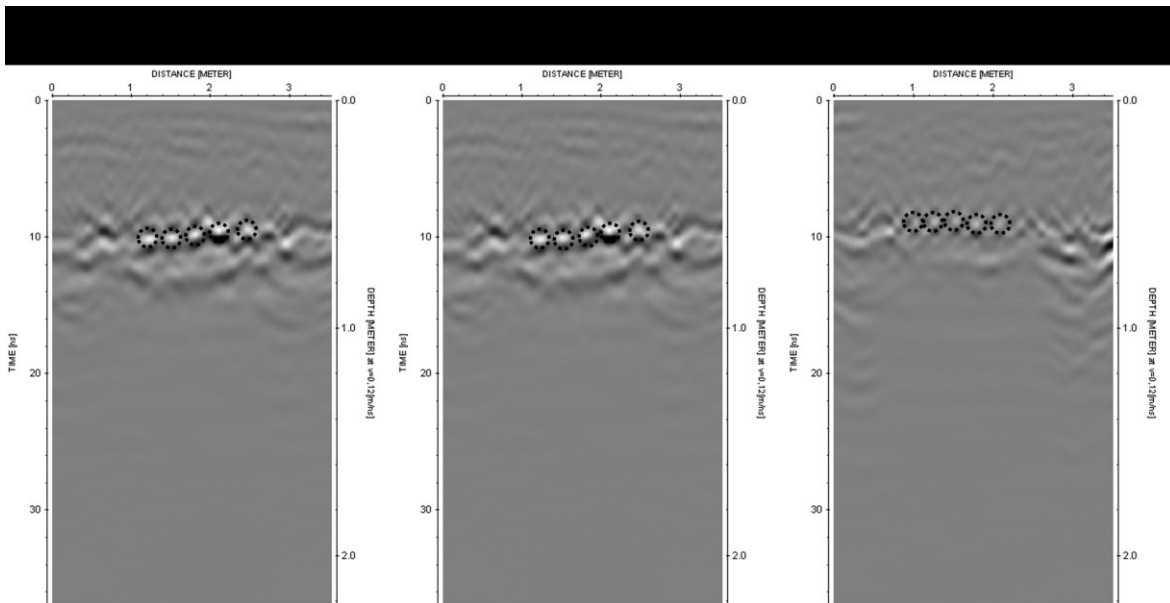


Figure 4-19 : Analyse des radargrammes traités - exemple de la ligne longitudinale (L05) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 1

- Avec la polarisation 2 (les antennes émettrice et réceptrice parallèles au sens de déplacement) :
  - Nous arrivons à voir l'interface remblais-béton (réflexion sur l'extrados de la dalle) et l'interface béton-air (réflexion sur l'intrados de la dalle). Il est difficile de pouvoir distinguer clairement l'interface béton désagrégé-béton sain.
  - Le signe de la dégradation est la disparition d'une partie de la réflexion de ces interfaces sur le radargramme. Sur la figure 4-20, nous voyons que l'extrados et l'intrados des dalles D1 et D2 sont plus visibles et continus que ceux de la dalle D3.

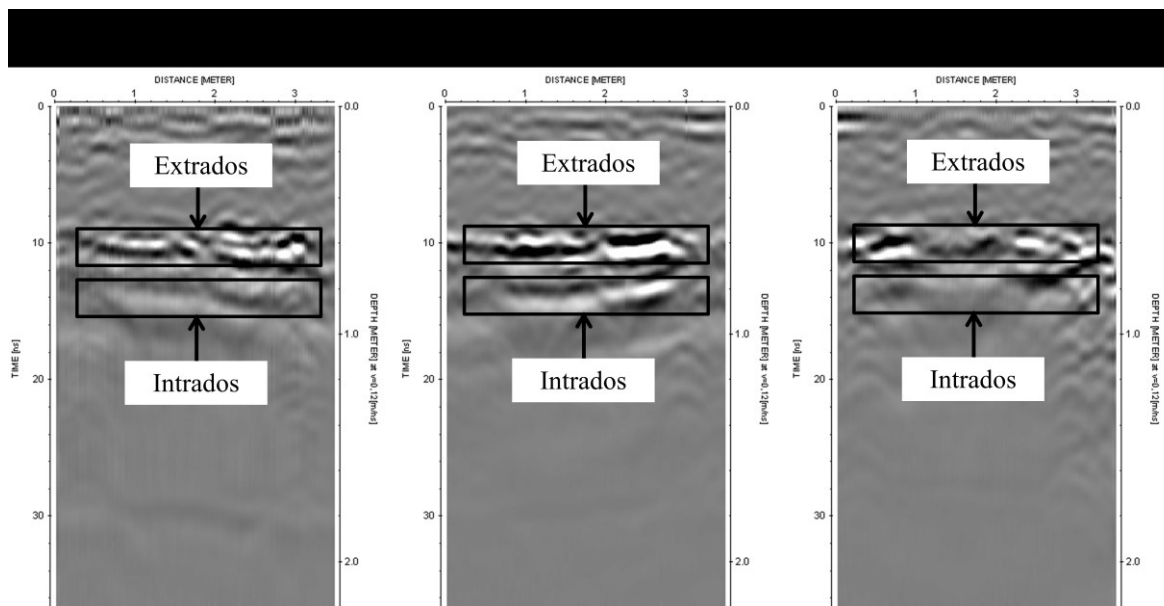


Figure 4-20 : Analyse des radargrammes traités - exemple de la ligne longitudinale (L05) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 2

Grâce à l'analyse visuelle, nous avons pu déceler les interfaces et les signes qui sont susceptibles de nous rendre compte de l'état des dalles. Mais pour valider ces observations, une étude sur les amplitudes et les temps de réflexion au niveau de ces interfaces s'avère indispensable.

### 4.3.2 Analyse des amplitudes de réflexion

Le but de cette étude est de comparer les valeurs des amplitudes de réflexion sur une interface donnée pour une même ligne pour les trois dalles. Pour ce faire, parmi les interfaces que l'analyse visuelle nous offrait, nous avons retenues :

- L'interface béton-armature supérieure (réflexion sur les armatures supérieures)
- Et l'interface béton-air (réflexion sur l'intrados de la dalle). Nous avons choisi ce dernier au lieu de l'extrados, car il rend mieux compte de l'état de la dalle. En effet, l'onde traverse toute l'épaisseur de la dalle avant de se réfléchir, et donc, toute la zone de dégradation peut importe son épaisseur.

#### 4.3.2.1 Analyse des amplitudes de réflexion sur les armatures supérieures

Nous avons fait un Pick sur les armatures supérieures (figure 4-21), pour les 7 (sept) lignes longitudinales qui traversent effectivement les dalles, c'est à dire de L01 à L07. Cette opération a été effectuée pour les trois dalles. Elle a permis d'avoir les valeurs des amplitudes de réflexion sur les armatures pour chaque ligne de chaque dalle. Nous avons ensuite construit des diagrammes (figure 4-22), qui permettent de comparer pour une même ligne, ces valeurs pour les trois dalles.

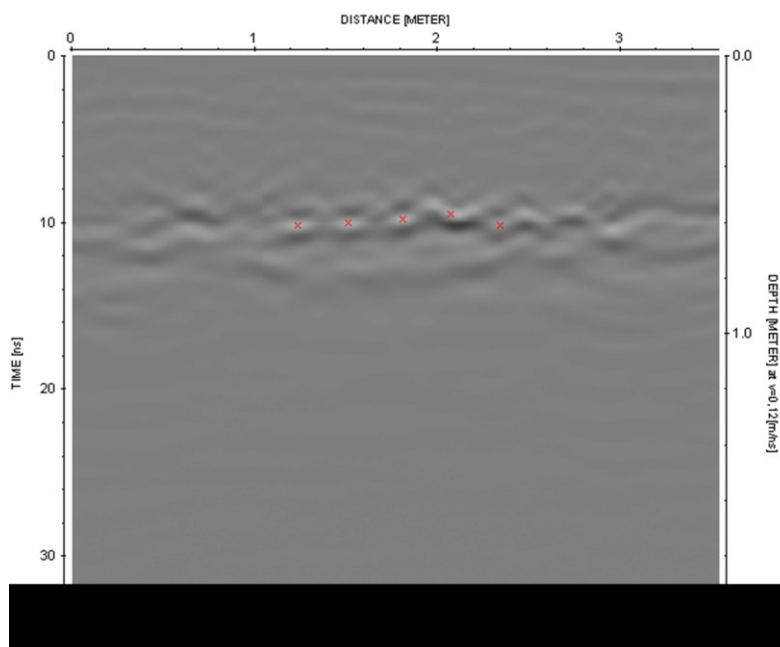
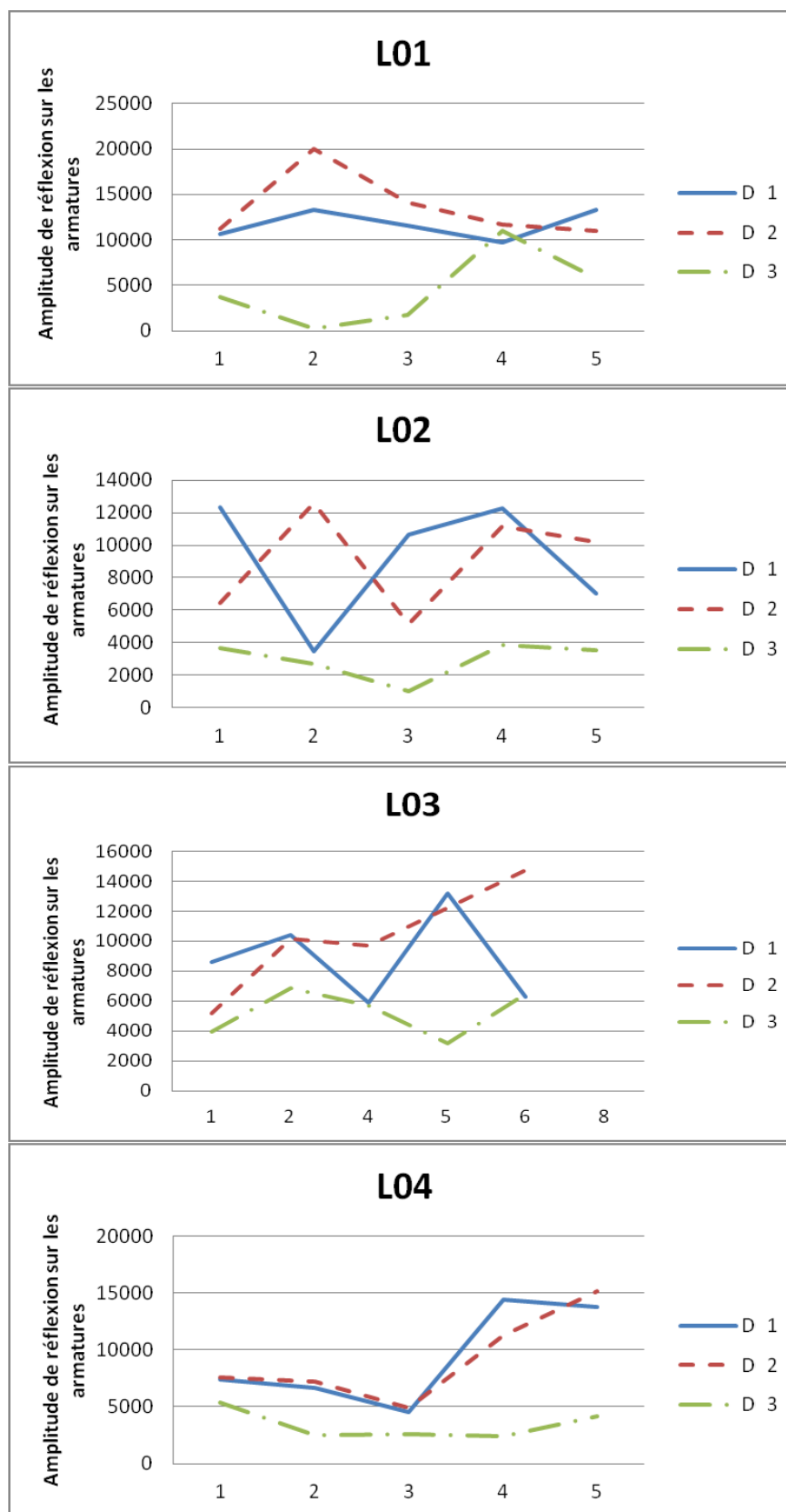


Figure 4-21 : Exemple de l'opération de Pick sur les armatures



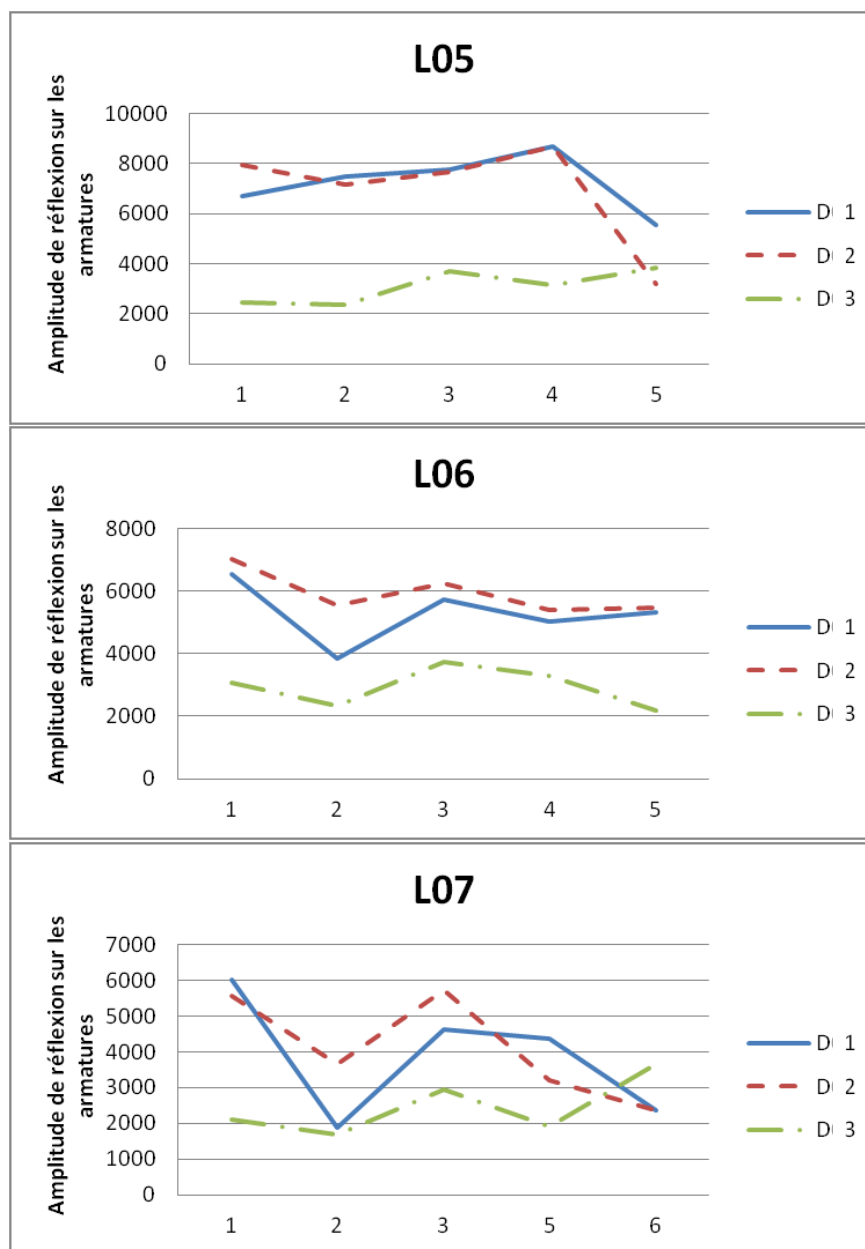


Figure 4-22 : Comparaison des amplitudes de réflexion sur les armatures des trois dalles avec les lignes longitudinales L01 à L07

Sur ces diagrammes, nous voyons que pour toutes les lignes, les amplitudes de réflexion au niveau de la dalle D3 sont inférieures à celle des dalles D1 et D2. Par contre, il n'est pas possible de dégager une tendance claire entre les dalles D1 et D2. Ceci confirme donc les constats visuels faits ; où nous avons vu que les points qui représentent les armatures étaient d'une clarté plus vive sur les radargrammes des dalles D1 et D2 que sur celui de la dalle D3.

#### 4.3.2.2 Analyse des amplitudes de réflexion sur l'intrados des dalles

Comme précédemment, nous avons effectué un Pick (polarisation négative) sur l'interface béton-air (figure 4-23) pour les 7 (sept) lignes longitudinales L01 à L07 des trois dalles. Nous avons ensuite construit les diagrammes (figure 4-24) qui permettent de comparer pour une même ligne, les valeurs (absolues) des amplitudes de réflexion pour les trois dalles.

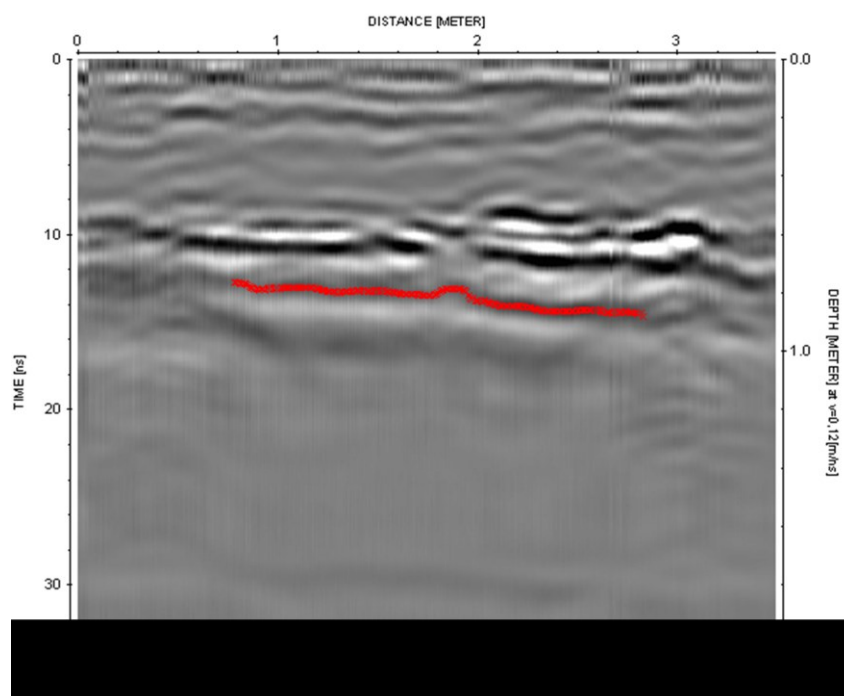
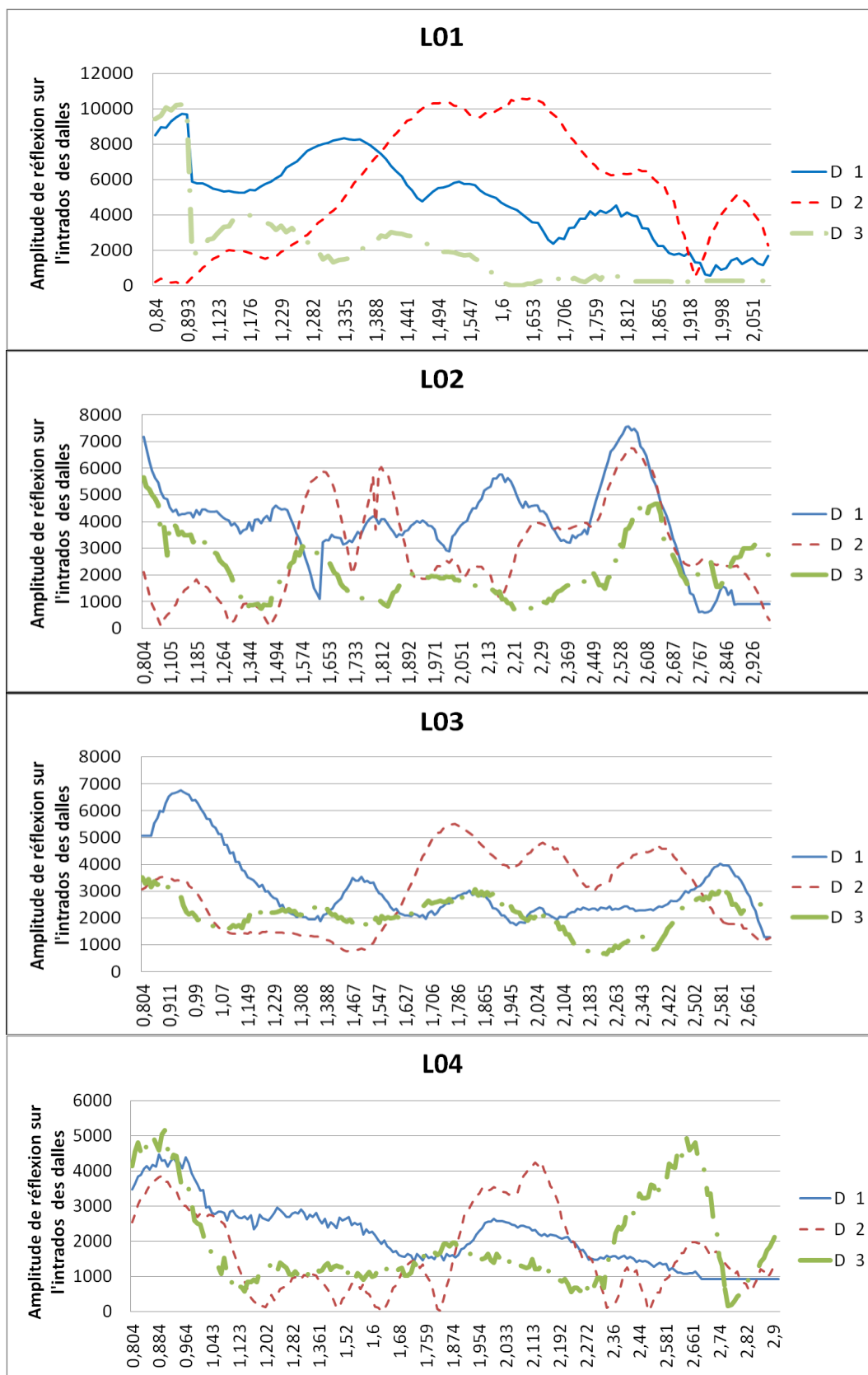


Figure 4-23 : Exemple de l'opération de Pick sur intrados d'une dalle





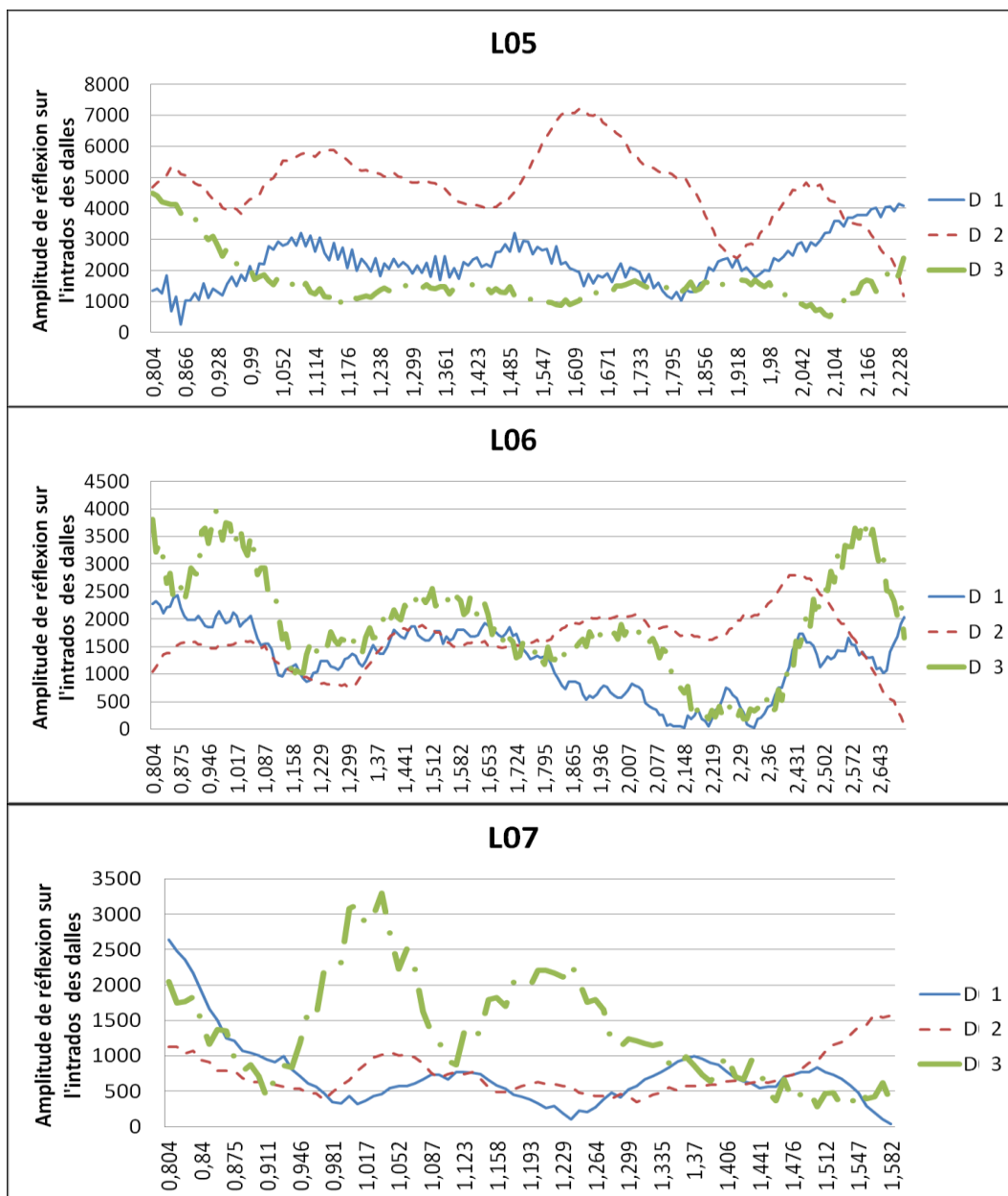


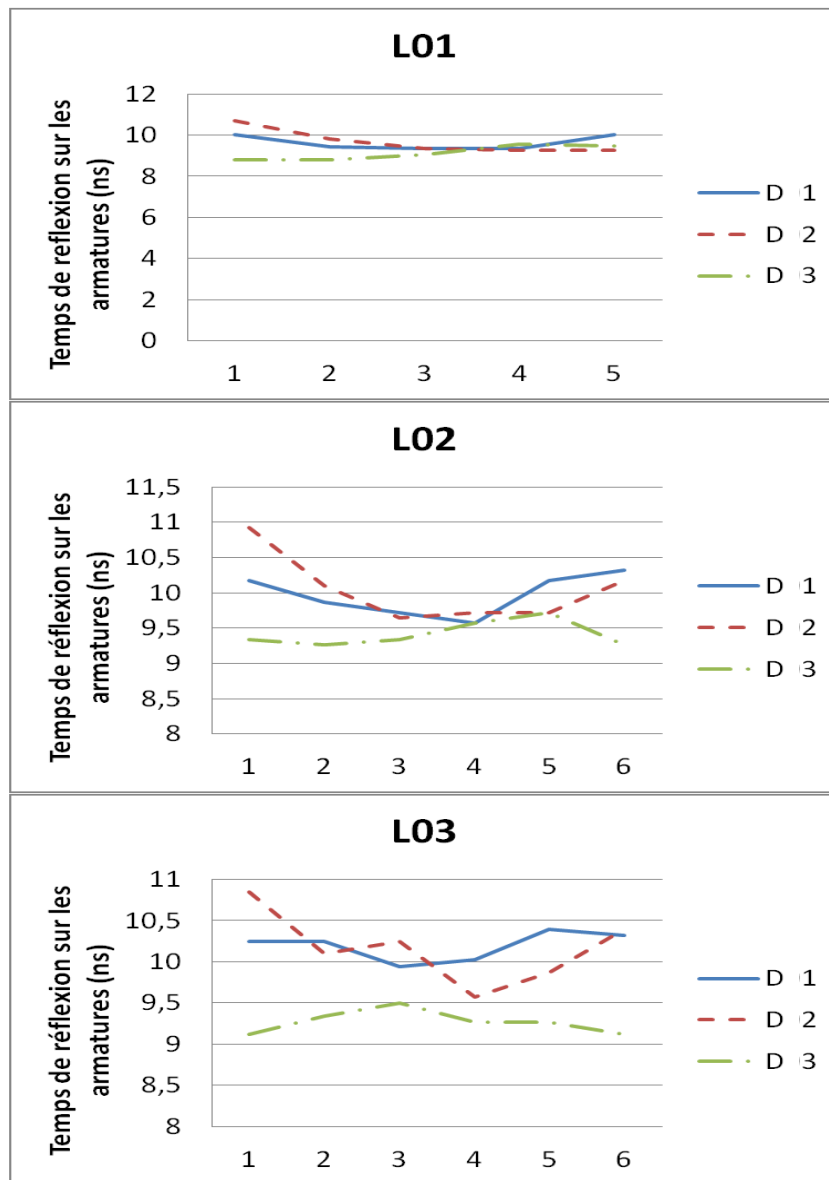
Figure 4-24 : Comparaison des amplitudes de réflexion sur l'intrados des trois dalles avec les lignes longitudinales L01 à L07

Sur ces diagrammes, nous voyons qu'à part les lignes L06 et L07, pour toutes les autres lignes, les amplitudes de réflexion au niveau de la dalle D3 sont inférieures à celle des dalles D1. En effet, les courbes de la dalle D3 sont généralement en dessous de celle de la dalle D1. Cependant, il est difficile de dégager une tendance claire entre les dalles D1 et D2 ou D2 et D3. Ceci confirme donc, le constat visuel où nous avons vu que l'intrados de la dalle D1 était

plus visible et continue que celui de la dalle D3. Mais, nous ne pouvons confirmer le constat visuel fait entre la dalle D2 et D3.

### 4.3.3 Analyse des temps de réflexion sur les armatures

Avec l'opération de Pick effectuée précédemment sur les armatures supérieures pour les 7 (sept) lignes longitudinales, L01 à L07 des trois dalles ; nous avons extrait les temps de réflexion sur ces armatures. Nous avons ensuite construit des diagrammes (figure 4-25), qui permettent de comparer pour une même ligne, ces valeurs pour les trois dalles.



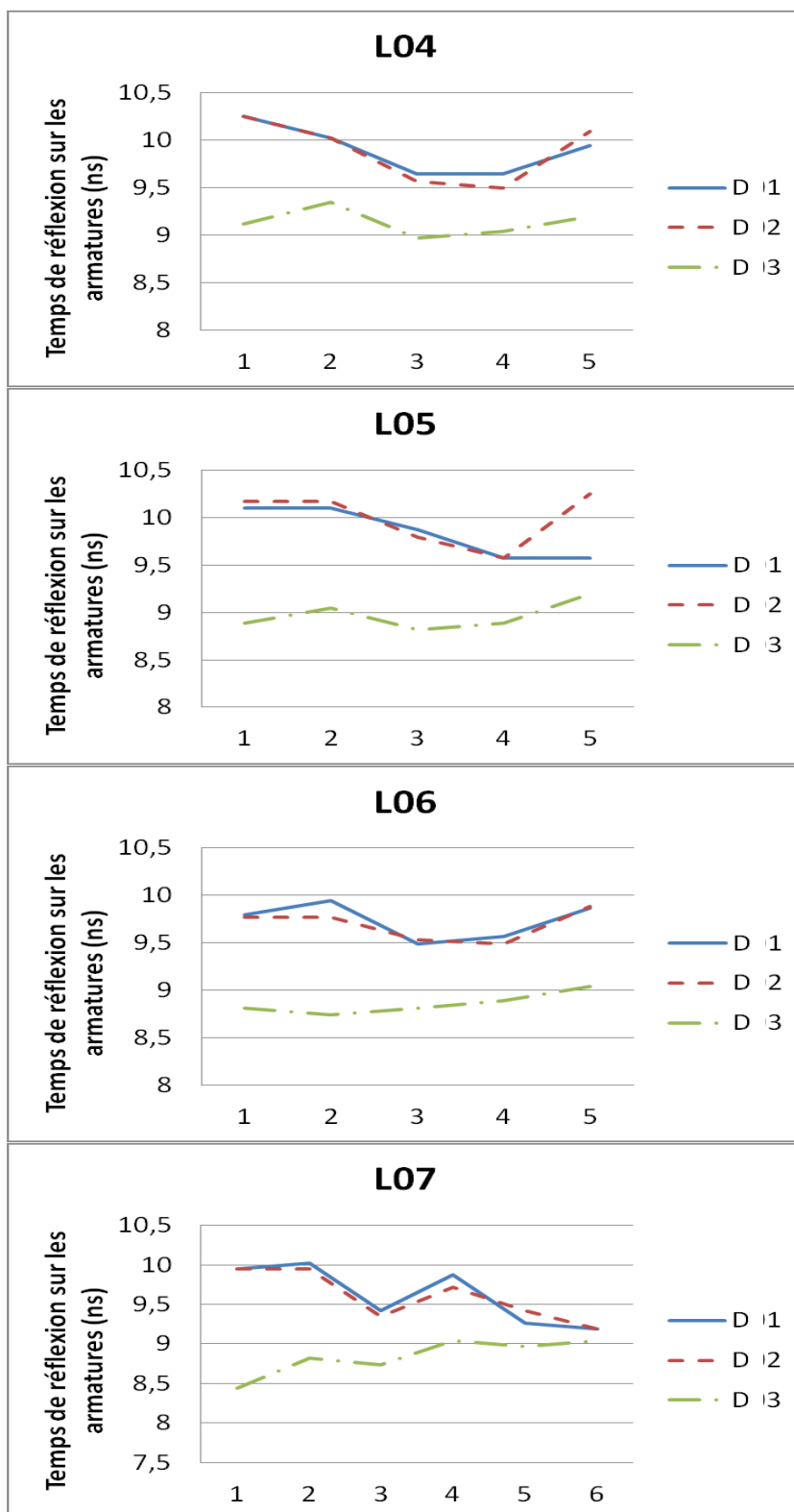


Figure 4-25 : Comparaison des temps de réflexion sur les armatures des trois dalles avec les lignes longitudinales L01 à L07

Sur ces diagrammes nous observons que sur les lignes L02 à L07, les temps de réflexion au niveau de la dalle D3 sont inférieures à ceux des dalles D1 et D2. Cette tendance se maintient aussi au début des lignes L01 (les quatre premières armatures). Cependant, il est impossible de tabler sur une tendance entre les dalles D1 et D2.

Le fait que les points qui représentent les armatures, se situent plus hauts sur le radargramme de la dalle D3, contrairement à ceux des dalles D1 et D2, est donc justifié.

#### 4.3.4 Interprétations des résultats

Au terme des analyses effectuées, nous remarquons que les constats faits visuellement sur les radargrammes où nous distinguons bien les armatures supérieures (polarisation 1) sont confirmés par l'analyse des amplitudes et des temps de réflexion. Comme, nous ne sommes pas arrivés à confirmer totalement par l'analyse des amplitudes les constats faits sur les radargrammes obtenus avec la polarisation 2 notre interprétation se basera surtout sur l'étude des réflexions sur les armatures supérieures.

Ainsi, les deux aspects qui démontrent une différence probable d'état entre les dalles en se basant sur les armatures supérieures sont :

- La mauvaise visibilité des armatures
- Et l'arrivée en avance de la réflexion sur les armatures se trouvant dans une zone désagrégée.

En effet, de manière théorique lorsque des armatures se trouvent dans une zone désagrégée, l'intensité de réflexion au niveau de celles-ci est plus basse que si elles se trouvaient dans une zone saine, car le signal y est plus atténué. En plus, en théorie on a :

$$\varepsilon_r \text{ béton désagrégé} < \varepsilon_r \text{ béton sain} \quad \text{or } v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad , \text{ donc } v_{\text{béton sain}} < v_{\text{béton désagrégé}}$$

[Laurens, 2001].

Alors pour une même épaisseur de béton on a  $t_{\text{béton désagrégé}} < t_{\text{béton sain}}$  (car  $d = v * t$ )  
où

$\varepsilon_r$  - permittivité relative du milieu

$v$  - vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu

$c$  - vitesse de la lumière dans le vide

t - temps de réflexion des ondes

Ceci dit, sur les radargrammes, la réflexion des armatures se trouvant dans une zone désagrégée est en avance de celles se trouvant dans une zone saine.

En se rapportant à notre étude, nous pouvons conclure, qu'au regard de la dalle D1 et/ou de la dalle D2, la dalle D3 est probablement endommagée. Mais il est difficile d'apprécier l'état de la dalle D2 par rapport à la dalle D1.

En supposant que l'état initial (sain) d'une même dalle est représenté par la dalle D1 que son état après désagrégation est représenté par la dalle D3, et que l'épaisseur de remblai est connue avec précision, il s'avère donc possible de constater la désagrégation dans le béton. En caractérisant le milieu global de propagation, il serait possible de convertir les temps de réflexion sur l'interface remblais-béton (réflexion sur l'extrados de la dalle) en profondeur, afin d'évaluer l'étendu de cette dégradation.

La détermination de la vitesse globale  $v_g$  des ondes radar est possible à partir du calcul des hyperboles effectué lors du processus de migration. La valeur trouvée de  $v_g = 0,09 \times 10^9$  m/s fournit le résultat de migration le plus représentatif des armatures et sera utilisé pour le calcul. À partir de cette vitesse globale et en considérant le temps de trajet moyen pour la réflexion sur la surface de la dalle, il serait possible d'estimer la profondeur de cette surface ; et donc l'épaisseur du remblai. En plus, il sera possible de déduire la constante diélectrique relative du remblai, afin de la comparer à la valeur théorique pour valider nos estimations. Pour ce faire, il faudra considérer les temps de trajet dans l'asphalte et dans le remblai séparément.

En se basant sur les radargrammes obtenus avec les relevés de la polarisation 2, on déduit le temps de trajet moyen  $T = 11,2$  ns pour la réflexion sur la surface de la dalle D1 (figure 4-26 ) grâce à une opération de Pick.

L'épaisseur moyenne d'asphalte constatée est de 10 cm. On peut alors déduire l'épaisseur de remblai  $E_r$  en considérant que  $\frac{E_r + 10 \text{ cm}}{9 \text{ cm/ns}} = \frac{T}{2} = 5,6 \text{ ns}$ . On obtient  $E_r = 40 \text{ cm}$ . La surface de la dalle D1 aurait donc une profondeur moyenne de 50 cm ou de 65 cm par rapport au niveau supérieur du trottoir.

En fixant la constante diélectrique relative de l'asphalte à 4, on obtient la vitesse de propagation dans l'asphalte  $V_a = 15 \text{ cm/ns}$ , donc le temps du trajet dans l'asphalte

$T_a = \frac{10 \text{ cm}}{15 \text{ cm/ns}} = 0,67 \text{ ns}$ . On peut donc déduire le temps du trajet dans le remblai  $T_r = \frac{T}{2} -$

$T_a = 4,93 \text{ ns}$ , et ensuite la vitesse de propagation dans le remblai  $V_r = \frac{40 \text{ cm}}{4.93 \text{ ns}} = 8,1 \text{ cm/ns}$ .

Cette vitesse donne une constante diélectrique relative du remblai  $\epsilon_r = 13,7$  ; ce qui est bien représentatif d'un sol ordinaire.

De même pour la dalle D3, on obtient un temps de trajet moyen  $T=12 \text{ ns}$ , donc une épaisseur de remblai  $E_r \approx 44 \text{ cm}$ . On constate donc une variation de l'épaisseur de remblai de l'ordre de 4 cm entre la dalle D1 et la dalle D3. Cette variation d'épaisseur peut être considérée comme étendu des dégradations, si nous supposons que la dégradation a été simulée dans la dalle D3, par un vide comblé de matériau de remblai.

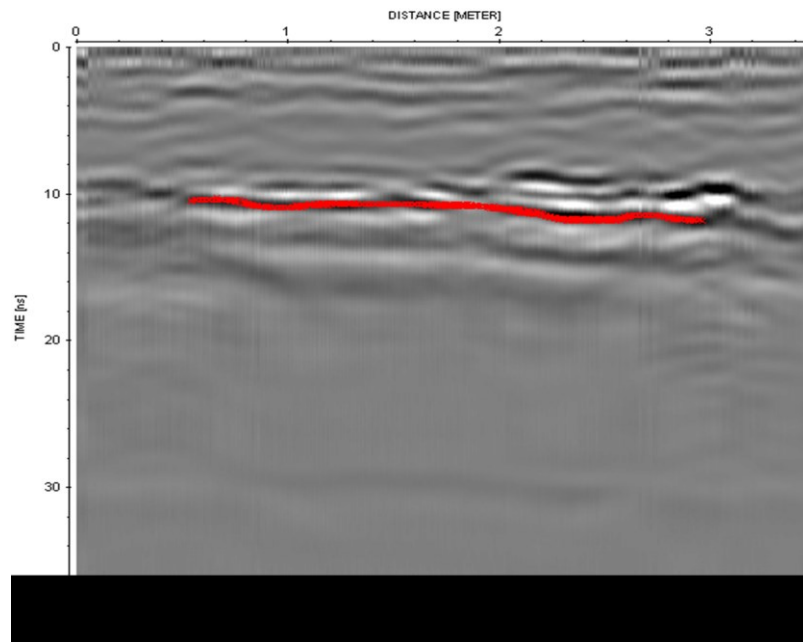


Figure 4-26: Exemple de l'opération de Pick sur l'extrados d'une dalle

## CHAPITRE 5 CONCLUSIONS

Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette maîtrise ont permis de démontrer la capacité du Géoradar à évaluer l'état de dégradation du béton des dalles enterrées à partir de la surface du sol. Les travaux ont été réalisés suivants deux axes majeurs, que sont la simulation numérique et l'expérimentation sur structures réelles.

La première étape des travaux, qui consistait à faire des simulations numériques, nous a permis de nous faire une idée des limites du dispositif Géoradar que nous possédions, pour faire nos essais et répondre à notre problématique. Ces limites se résumaient essentiellement au type de sol du remblai et à la profondeur d'enfouissement de la dalle. Nous pouvions supposer que les dégradations au niveau d'une dalle enfouie à une profondeur de moins de 100 cm, sous un remblai de type sableux, pouvaient être détectées par notre dispositif Géoradar.

La deuxième étape des travaux consistait à réaliser des essais sur des structures réelles pour valider nos conclusions issues de la simulation et proposé une méthodologie d'inspection des dalles enterrées avec le Géoradar. Les essais ont été réalisés sur des dalles de l'IREQ. Ils nous ont permis de voir que notre dispositif Géoradar était capable de déceler les dégradations au niveau des dalles enterrées sous un remblai de type sableux, pour une profondeur maximale de 75 cm. Nous avons décidé de nous limiter à cette profondeur, car même si le dispositif permet de localiser les dalles enfouies plus profondément il ne permet pas d'avoir la précision nécessaire pour évaluer l'état de dégradation du béton de ces dalles.

La méthodologie probable proposée pour déceler l'état de dégradation du béton des dalles enterrées à partir de la surface du sol se présente comme suit :

- Localiser à la surface l'emplacement de la dalle enterrée
- Matérialiser sur la zone de localisation de la dalle, les lignes de relevés selon un quadrillage dans les deux sens et un espacement de lignes de 25 cm au maximum.
- Effectuer les relevés Géoradar suivant les lignes du quadrillage avec des antennes de 400 et 600 MHz suivant deux polarisations de celles-ci. Une où les antennes sont perpendiculaires au sens de déplacement et l'autre où elles sont parallèles au sens de déplacement.

- Effectuer le traitement pour chaque polarisation à part par logiciel spécialisé afin de faire ressortir les interfaces de réflexion.
- Effectuer l'analyse des données séparément, en se basant surtout sur les réflexions au niveau des armatures et de la surface de la dalle. Les indices de dégradation seront la mauvaise visibilité des armatures, l'arrivée en avance de la réflexion sur les armatures se trouvant dans une zone désagrégée ou une surface de dalle comportant des rugosités.

Il est important de souligner que dans notre approche, nous recommandons absolument de faire les relevés avec les antennes parallèles au sens de déplacement. Ceci afin de minimiser les réflexions sur les armatures pour mieux faire ressortir celles sur la surface des dalles. En effet, l'habitude a été prise que les relevés ne se faisaient qu'avec des antennes perpendiculaires au sens de déplacement, car la plupart des systèmes Géoradar vendus sont conçus de cette façon.

L'analyse des résultats des essais effectués sur les dalles D1, D2 et D3 de l'IREQ nous ont amené aux conclusions suivantes :

- Au regard de la dalle D1 et/ou de la dalle D2, la dalle D3 est probablement endommagée.
- Il est difficile d'apprécier l'état de la dalle D2 par rapport à la dalle D1 car on n'y remarque pas une grande différence au niveau des réflexions sur les différentes interfaces.
- Il n'est pas possible de déceler l'interface béton désagrégé-béton sain. Et donc, d'estimer pour une dalle désagrégée la perte d'épaisseur de la dalle de béton, sans se référer à un état initial.

C'est pour cela que nous recommandons de faire un relevé juste après la construction de l'ouvrage (à l'état initial) afin de faciliter son suivi dans le temps.

Même si tous les objectifs n'ont pas pu être atteints, les résultats des essais effectués sur les structures du site expérimental démontrent que la méthodologie proposée peut effectivement permettre de faire l'inspection des dalles enterrées.

Les avantages de l'utilisation du géoradar comme instrument d'inspection des dalles enterrées par rapport aux autres instruments peuvent être énumérés comme suit :



- On peut connaître l'état de la dalle sans faire des excavations. Les relevés à la surface sont suffisants.
- La durée pour effectuer les relevés n'est pas longue, donc peut d'impact sur la circulation dans une zone achalandée.
- Les relevés sont effectués sans émettre de bruits et les bruits environnant affectent peu leur qualité.
- Si la géométrie des dalles est connue (profondeur, épaisseur), il n'est pas nécessaire de faire des forages coûteux, pour valider les paramètres de propagations des ondes dans le milieu.

Afin de perfectionner la méthode d'inspection proposée, il serait judicieux de faire des essais similaires sur d'autres dalles en service enterrées. Nous devrions connaître à l'avance l'état de dégradation de ces dalles et leur géométrie. Nous aurions des dalles intactes et des dalles endommagées, afin d'établir une correspondance claire entre les relevés obtenus et l'état des dalles. La connaissance de la géométrie des dalles nous permettra de valider plus facilement les propriétés de propagation des ondes électromagnétiques dans le milieu, obtenues par le calcul et donc d'affiner la précision des résultats qu'en à l'évaluation de l'état des dalles par caractérisation de la rugosité des surfaces de celles-ci, et à l'estimation de l'épaisseur de dégradation. Ces deux derniers aspects, que nous n'avons pas pu explorés dans notre étude, constituent certainement les points futurs, qui permettront à la technique Géoradar de se démarquer totalement des autres techniques.

## **ANNEXE**

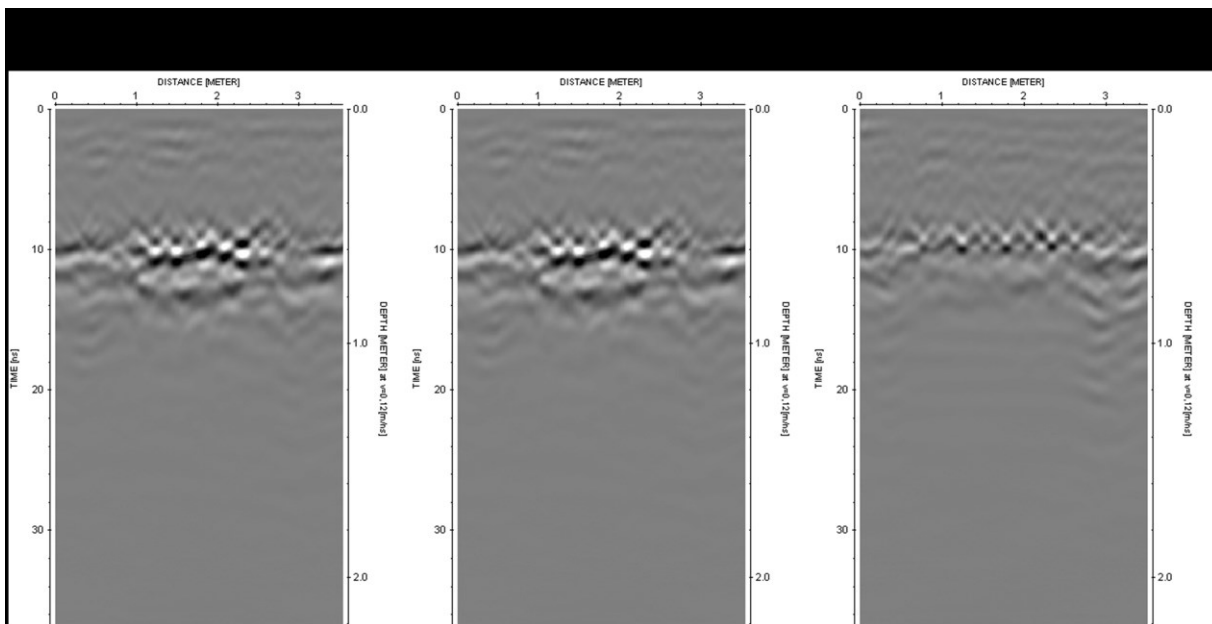


Figure A-1 : Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L03) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 1

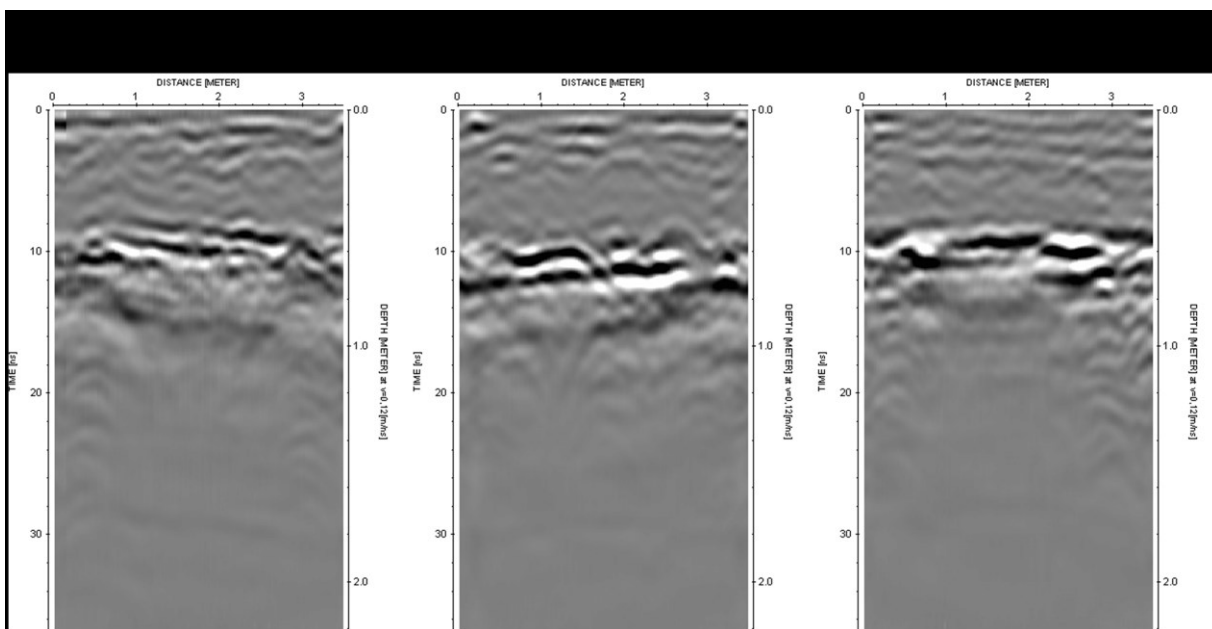


Figure A-2 : Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L03) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 2

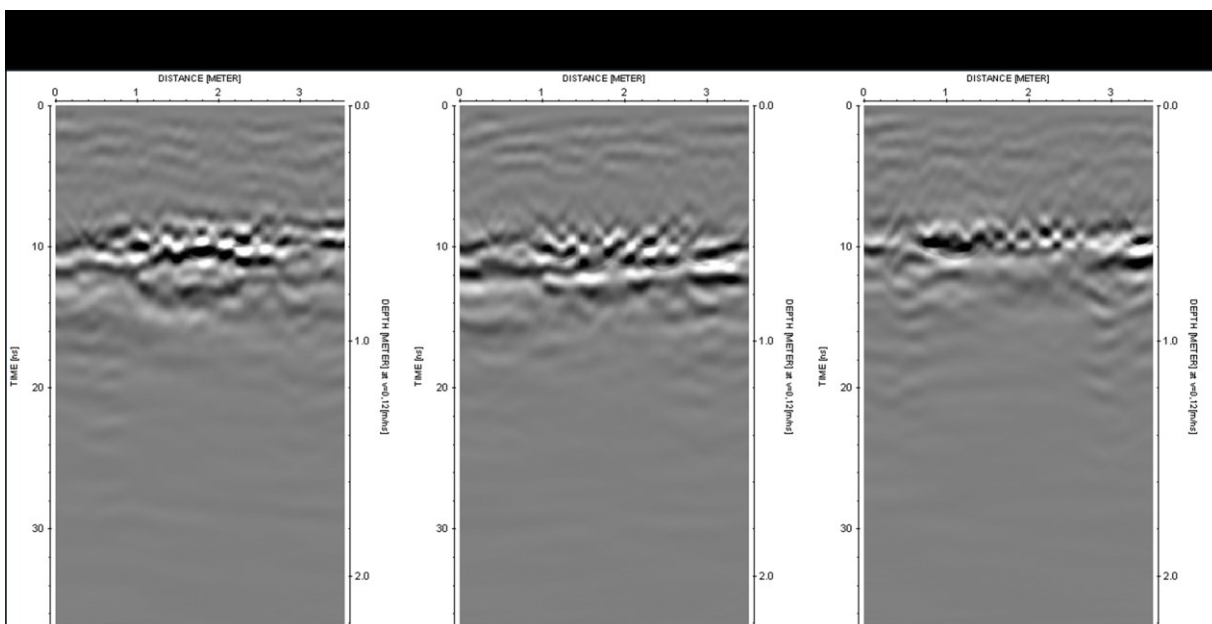


Figure A-3 : Radargrammes mixtes de la ligne longitudinale (L03) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz

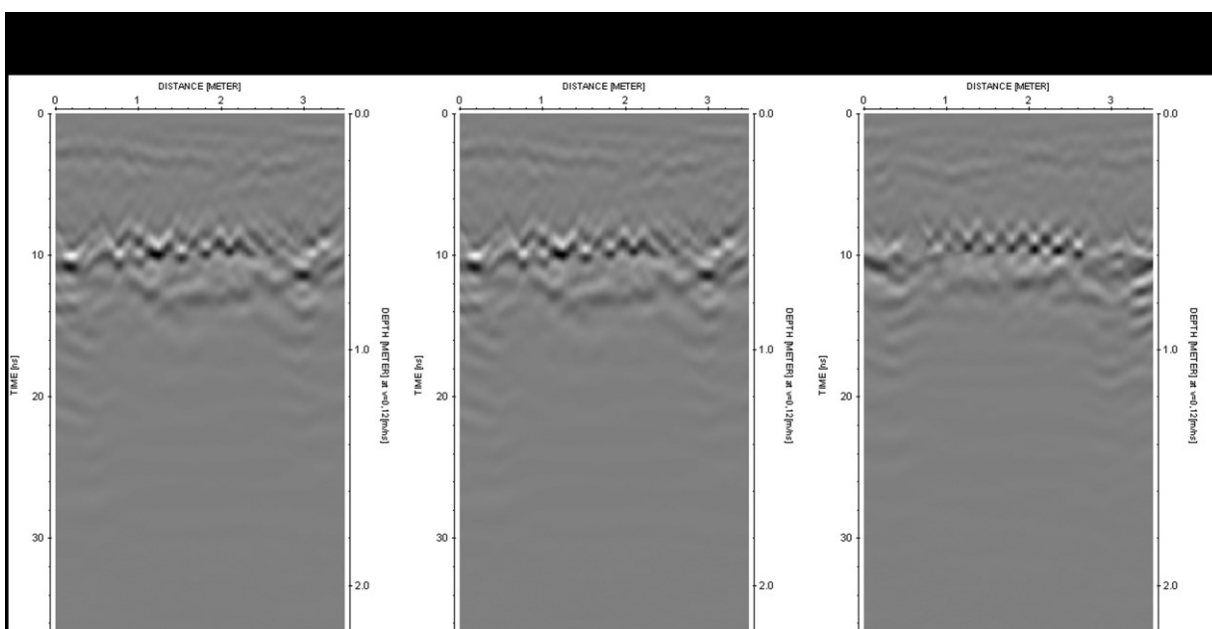


Figure A-4: Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L07) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 1

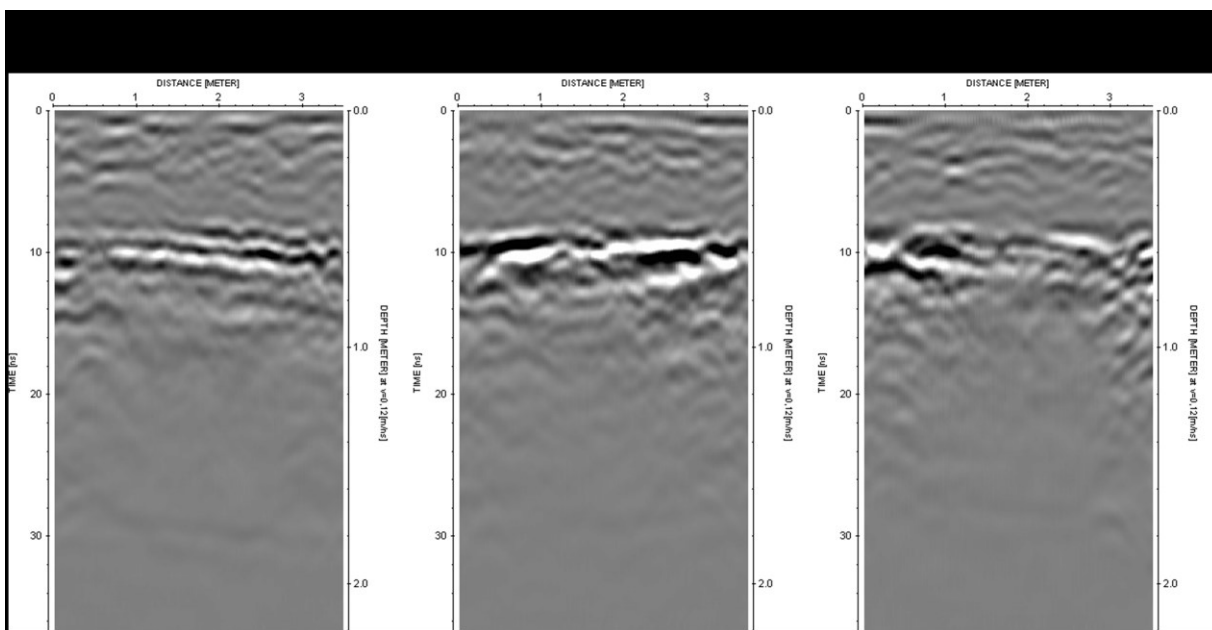


Figure A-5 : Radargrammes traités de la ligne longitudinale (L07) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz, avec la polarisation 2

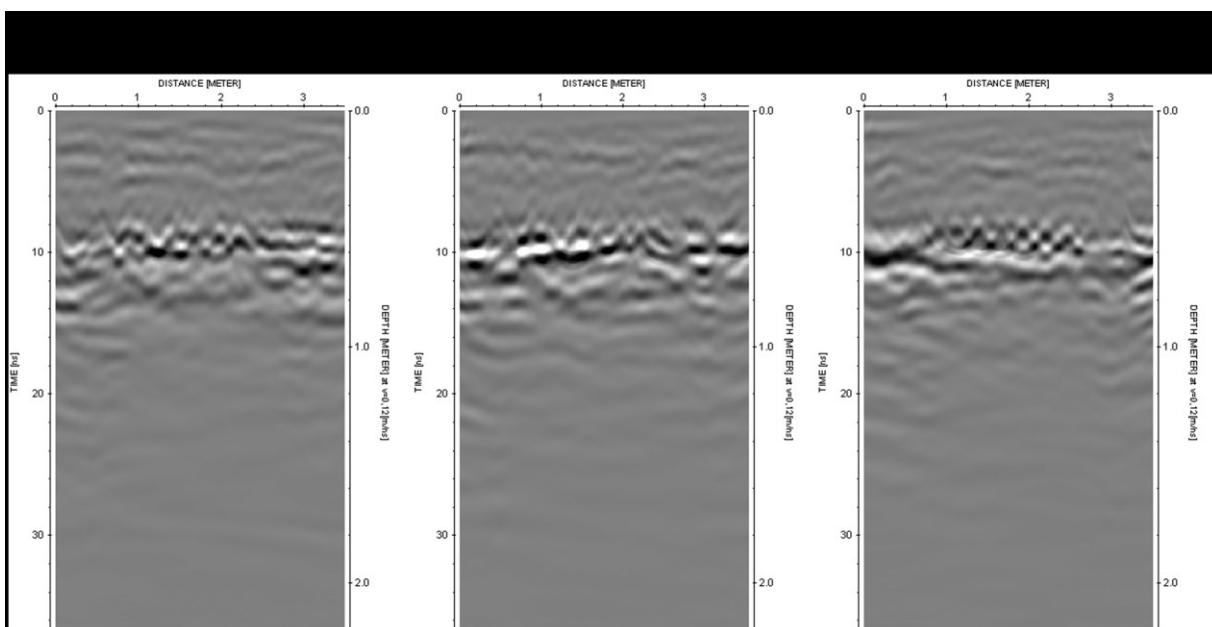


Figure A-6 : Radargrammes mixtes de la ligne longitudinale (L07) pour les dalles D1, D2 et D3 à la fréquence de 400MHz

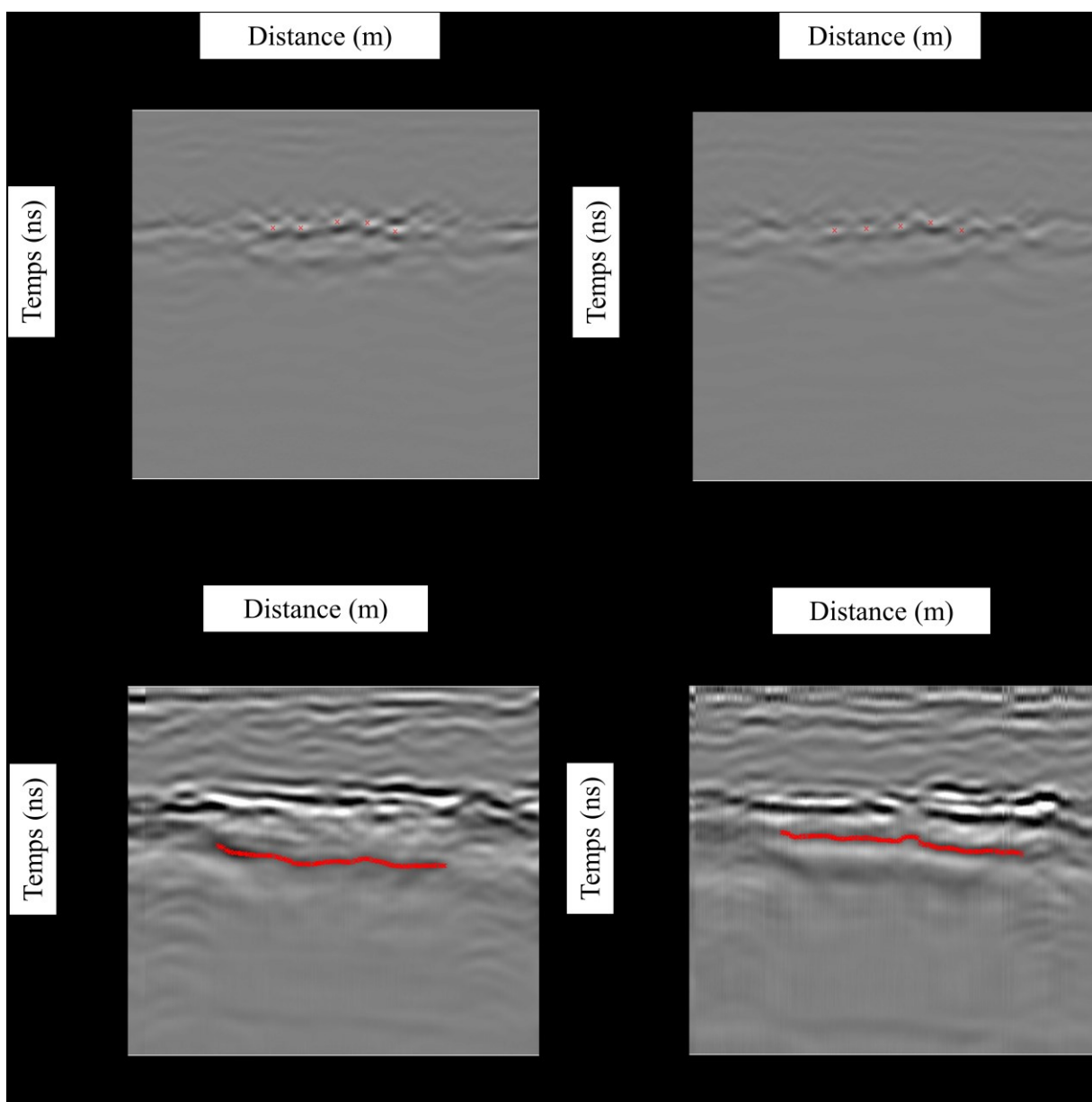


Figure A-7 : Exemple de Picks effectués sur dalle D1

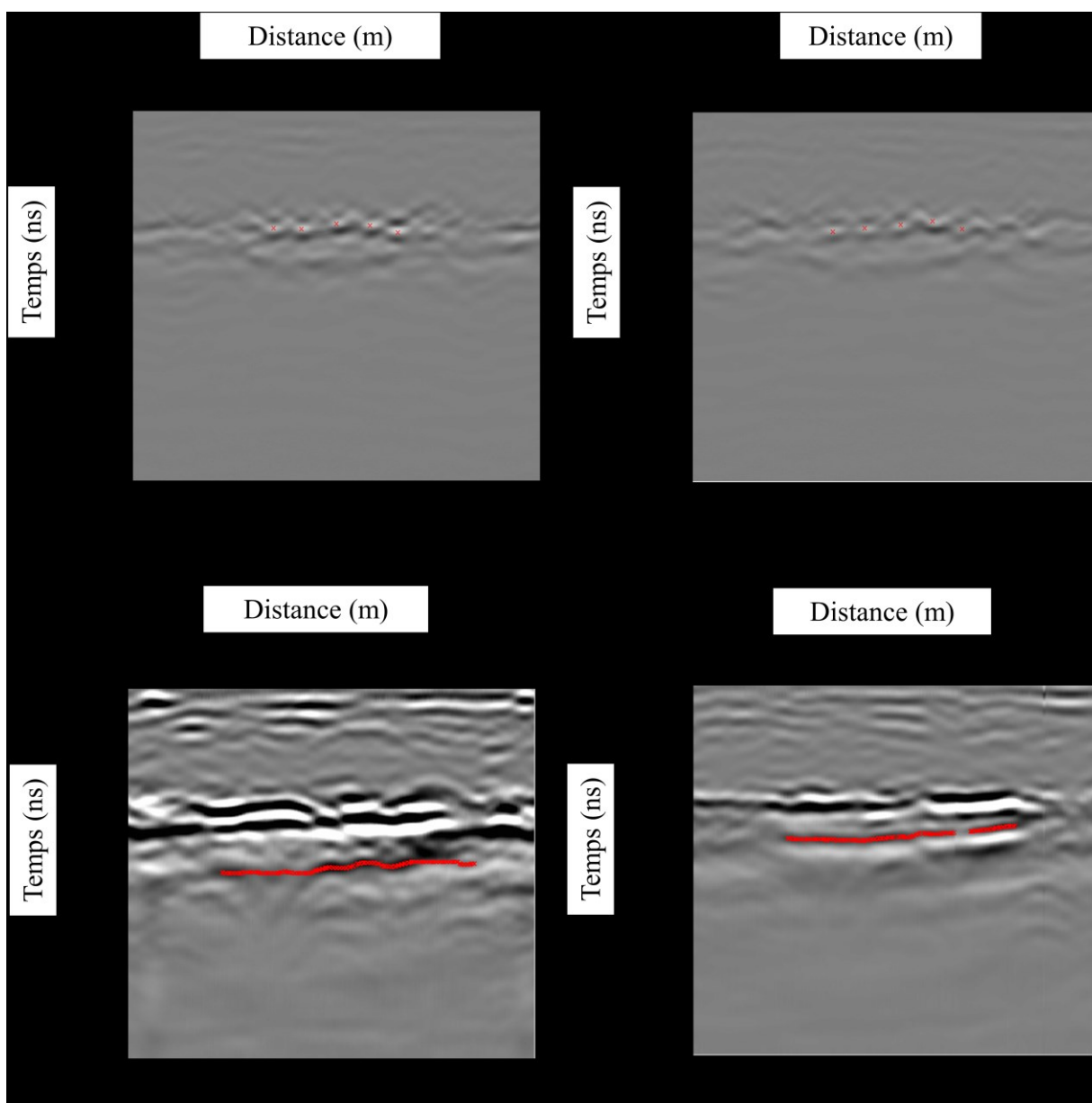


Figure A-8 : Exemple de Picks effectués sur dalle D2

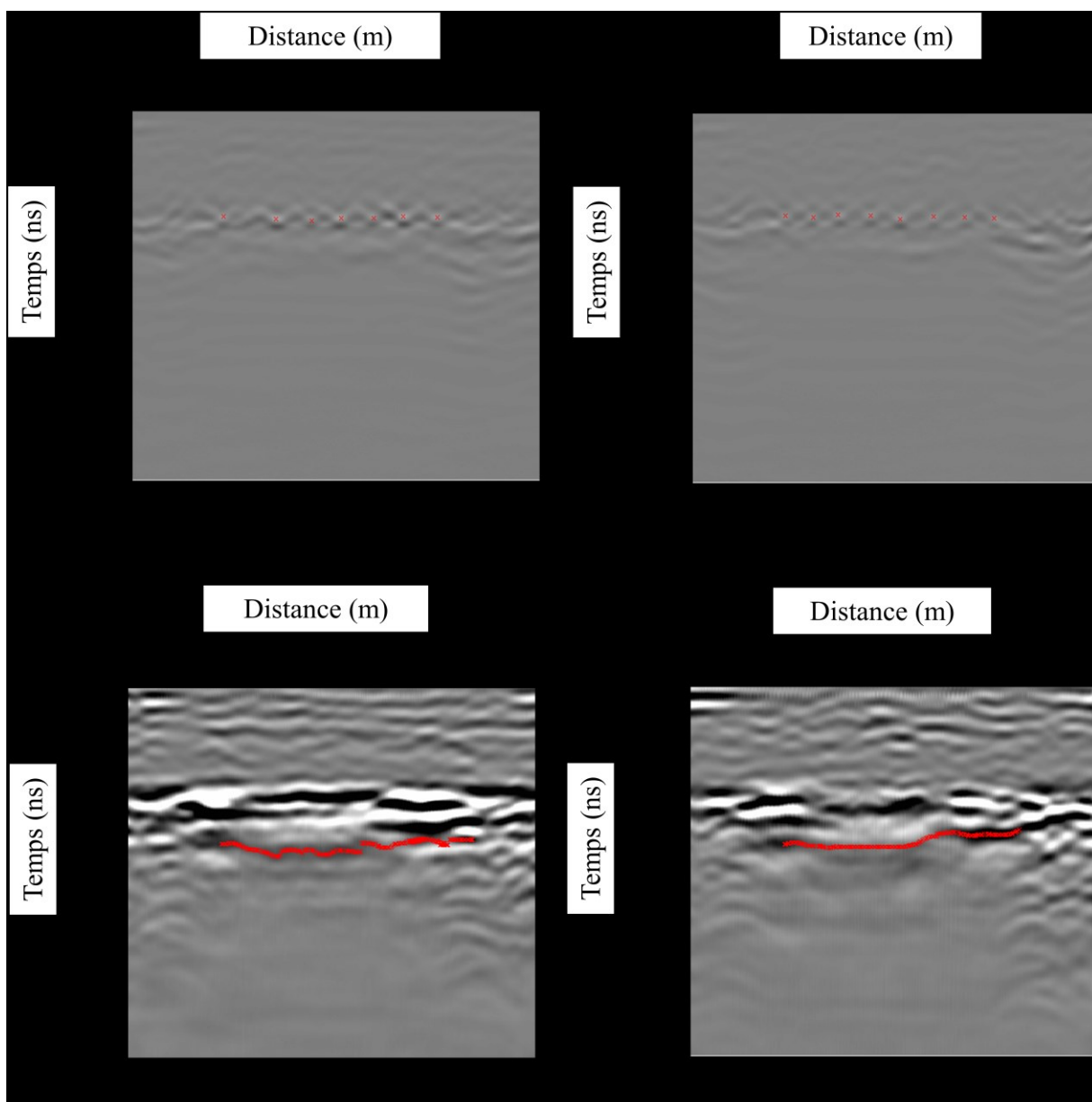


Figure A-9 : Exemple de Picks effectués sur dalle D3



# LISTES DES RÉFÉRENCES

- Broomfield, J. P. (2007). Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair. , 2 édition. Taylor & Francis, 277 p.
- Bungey, J. H. (2004). Sub-surface radar testing of concrete: a review. Construction and Building Materials, volume vol. 18, numéro I, p. 1-8.
- Cannazza, G., Cataldo, A., Leucci, G., Persico, R. et Soldovieri, F. (2012). Integrated use of GPR and TDR for soil permittivity evaluation. Dans 2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR 2012, June 4, 2012 - June 8. IEEE Computer Society, Shanghai, China, p. 23-27.
- Chung, T., Carter, C. R., Masliwec, T. et Manning, D. G. (1994). Impulse radar evaluation of concrete, asphalt and waterproofing membrane. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, volume 30, numéro 2, p. 404-415.
- Clark, W. W., Burns, B. P. et Ralston, J. M. (2005). Soil effects on GPR antenna image quality. Dans Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets X, March 28, 2005 - April 1, volume 5794. SPIE, Orlando, FL, United states, p. 968-977.
- Conyers, L. B. (2004). Moisture and soil differences as related to the spatial accuracy of GPR amplitude maps at two archaeological test sites. Dans Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, volume 2. IEEE, Piscataway, NJ, USA, p. 435-8.
- Courard, L. (2010). Pathologie des bétons : Cours d'auscultation et réparation des ouvrages en béton Université de Liège, 130 p.
- Davis, A. G., Lim, M. K. et Petersen, C. G. (2005). Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods. NDT&E International, volume 38, numéro 3, p. 181-6.
- Dous, O. (2008). Evaluation de la probabilité de corrosion des armatures dans les dalles de beton arme par radar. Ph.D., Université de Sherbrooke (Québec), Canada.

- Fauchard, C. (2001). Utilisation de radars très hautes fréquences application à la l'auscultation non destructive des chaussées. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France.
- Filali, B., Boone, F., Rhazi, J. et Ballivy, G. (2008). Design and Calibration of a Large Open-Ended Coaxial Probe for the Measurement of the Dielectric Properties of Concrete. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, volume 56 (10), p. 2322-2328.
- Galagedara, L., Parkin, G. et Redman, D. (2004). Measuring and modeling of GPR ground wave depth penetration under transient soil moisture conditions. Dans Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, volume 2. IEEE, Piscataway, NJ, USA, p. 505-8.
- Geomatrix (2012). How deep can GPR see? Dans <http://www.georentals.co.uk/gprsee.htm>.
- Guegen, Y. et Palciauskas, V. (1992). Physique des roches, éd. Hermann édition
- Huston, D. R., Cui, J., Burns, D., Hurley, D. et Arndt, R. (2010). Multiple sensor subsurface condition assessment of reinforced concrete bridge decks. Dans 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2010, July 11, 2010 - July 15. Association for Computing Machinery, Philadelphia, PA, United states, p. 430-435.
- IAEA (2002). Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. volume 17, numéro ISSN 1018-5518, p. 137-151.
- Igel, J., Takahashi, K. et Preetz, H. (2011). Electromagnetic soil properties and performance of GPR for landmine detection: How to measure, how to analyse and how to classify? Dans 2011 6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2011). IEEE, Piscataway, NJ, USA, p. 6 pp.
- Laurens, S. (2001). Aptitude de la technique radar à la caractérisation du béton d'enrobage-Aide au diagnostic de la corrosion des armatures. Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke (Québec), Canada.
- Loken, M. (2005). Current state of the art and practice of using GPR for Minnesota roadway applications. Commercially Unpublished Final Report for Investigation, numéro 771.

- Lorenzo, H., Hernandez, M. C. et Cuellar, V. (2000). In-situ radar remote sensing applied to the detection of degradation in a concrete floor. 8th International Conference on Ground Penetrating Radar.. International Society for Optics and Photonics., 441-446 p.
- Louis, A. (2011). Détection de zones humides dans le béton par GPR en présence d'un gradient d'humidité. Master Ingénieur Civil, Université de Liège, France.
- Maser, K. R. et Sande, I. (2000). Application of ground penetrating radar for evaluation of sub-surface airfield pavement conditions. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, volume 42, numéro 7, p. 451-453.
- Metha, P. K. (1986). *Concrete Structures: Properties and Materials*. Prentice Hall, New Jersey, 449 p.
- Mommer, P., Dondonné, E. et Demars, P. (2004). Dégradation de dalles de tabliers de ponts en région wallonne. *Revue Scientifique des Instituts supérieurs Industriels Libres Francophones*, volume 18, p. 146-169.
- Nazi, H. et Sezgin, M. (2011). Effects of different soil types on strip-map GPR SAR images. Dans *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XVI*, volume 8017. SPIE - The International Society for Optical Engineering, USA, p. 80170Y (8 pp.).
- Neville, A. (1995). Chloride attack of reinforced concrete: an overview, *Materials and Structures*. volume 28, p. 63-70.
- Neyrat, M. (2009). Contribution à l'étude de G.P.R (Ground Penetrating Radar) multicapteurs. Méthodes directes et inverses en temporel. Doctoral dissertation, Université de Limoges, France.
- Nikmehr, S. et Poorziad, A. (2004). The effects of frequency dependent soil parameters and incident wave polarizations on GPR performance. Dans *The 10th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*. Conference Proceedings. IEEE, Piscataway, NJ, USA, p. 381-3.
- Pain, H. J. (2005). *The physics of vibrations and waves*. John Wiley and Sons, 557 p.

- Pettinelli, E., Vannaroni, G., Di Pasquo, B., Mattei, E., Di Matteo, A., De Santis, A. et Annan, P. A. (2007). Correlation between near-surface electromagnetic soil parameters and early-time GPR signals: an experimental study. *Geophysics*, volume 72, numéro 2, p. 25-8.
- Powers, M. H. (1997). Modeling frequency-dependant GPR. *The leading edge*, p. 1657-1662.
- Rafkani, Y. (2009). Investigation des limites des contrôles non destructifs par ultrasons et par radar sur le beton. M.Sc.A., Ecole Polytechnique, Montreal (Québec), Canada,
- Sagnard, F. et Rejiba, F. (2010). Géoradar Principes et applications . *Techniques de l'ingénieur Radiolocalisation*, volume te5228.
- Sbartai, Z. M., Laurens, S., Rhazi, J., Balayssac, J. P. et Arliguie, G. (2007). Using radar direct wave for concrete condition assessment: Correlation with electrical resistivity. *Journal of Applied Geophysics*, volume 62, numéro 4, p. 361-374.
- Shaari, A., Millard, S. G. et Bungey, J. H. (2002). Measurement of radar properties of concrete for in situ structural elements. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, volume 44, numéro 12, p. 756-758.
- Simi, A., Manacorda, G. et Benedetto, A. (2012). Bridge deck survey with high resolution Ground Penetrating Radar. Dans p. 489-495.
- Tarussov A., Vandry M. et Blais J. (2010). Cartographie De La Corrosion D'armatures Par Géoradar. volume Colloque annuel du MTQ.
- Tarussov, A., Vandry, M. et Haza, D. L. (2013). Condition assessment of concrete structures using a new analysis method: Ground-penetrating radar computer-assisted visual interpretation. *Construction and Building Materials*, volume 38, p. 1246-1254.
- Tillard, S. (1991). Évaluation des performances de la technique radar en prospection géophysique, Thèse, Université Louis Pasteur de Strasbourg I, France.
- Van der Wielen, A., Courard, L. et Nguyen, F. (2011). GPR Limits for Thin Layers in Concrete Detection: Numerical and Experimental Evaluation. *Piers Online*, volume 7, numéro 4, p. 339-342.
- Wunderlich, T. et Rabbel, W. (2011). Attenuation of GPR waves in soil samples based on reflection measurements. Dans 2011 6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR 2011). IEEE, Piscataway, NJ, USA, p. 4 pp.